



ЭЛЕКТРОТЕХНИКА, ЭЛЕКТРОНИКА, РАДИОТЕХНИКА
ЭЛЕКТРОТЕХНИКА, ЭЛЕКТРОНИКА, РАДИОТЕХНИКА
ELECTRICAL ENGINEERING, ELECTRONICS, RADIO ENGINEERING

DOI 10.51885/1561-4212_2023_4_164

MFTAA 44.41.35; 49.44.31

П.А. Дунаев¹, А.Д. Мехтиев², Қ.Ж. Наурыз³

«С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық университеті» КЕАҚ,
Астана қ., Қазақстан

¹E-mail: dunayev.kz@mail.ru*

²E-mail: barton.kz@mail.ru

³E-mail: naurizastana@mail.ru

ТАЛШЫҚТЫ-ОПТИКАЛЫҚ БАЙЛАНЫС ЖОЛДАРЫ НЕГІЗІНДЕ ЭНЕРГИЯ ТАРАТУ ЖҮЙЕСІНІҢ ЗЕРТХАНАЛЫҚ ҮЛГІСІН ӨЗІРЛЕУ ЖӘНЕ ЗЕРТТЕУ

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО ОБРАЗЦА СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ СВЯЗИ

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF A LABORATORY SAMPLE OF AN ENERGY TRANSMISSION SYSTEM BASED ON A FIBER-OPTIC COMMUNICATION LINE

Аңдатпа. Бұл мақалада энергия көздерінен едәуір қашықтықта орналасқан ультра аса төмен қуатты автономды электронды құрылғыларды электрмен қамтамасыз етуге мүмкіндік беретін талшықты-оптикалық байланыс жолы (ТОБЖ) бойынша энергия тарату жүйесінің зертханалық үлгісі әзірленеді және зерттеледі. Өзірленіп жатқан жүйе автономды стационарлық құрылғылар үшін мыс өткізгіштер мен аккумуляторларды пайдаланудан бас тартуға мүмкіндік береді, алайда техникалық іске асыру тұрғысынан белгілі бір қиындықтарды тудырады. Ұсынылған зерттеудің нәтижесінде зертханалық үлгі әзірленді, оның көмегімен фотодетектор тармағында ток пен кернеу мәндерін өлшеуге мүмкіндік болады. Мұнда эквивалентті генератор әдісімен қатар, активті екіұшты үшін екі арнайы түйінді белгілі тізбек заңдары қолданылды. Зерттеу саласындағы әдебиеттерді, ғылыми жетістіктер мен жаңалықтарды талдау кезінде шетелдік аналогтардан өзгеше өзіндік зерттеу тұжырымдамасы түзілді. Экспериментті жүргізу кезінде фотоқабылдағыш бос жүріс, қысқа тұйықталу режимдерінде болып, жоғары кедергілі жүктемеге қосылды. 10 және 30 МВт сәулелену көздерін (лазерлерді) пайдаланып, алынған эксперименттік мәліметтер бойынша вольт-амперлік сипаттамалар (ВАС) салынды. Сәулелену көзі мен сәулеленген кремний кристалының техникалық параметрлері мен сипаттамалары келтірілген. Электротехника заңдарын, соның ішінде Ом заңын қолдана отырып, шығыс электр қуаты анықталды. Алынған мәліметтерді өңдеу үшін функцияның квадраттық интерполяциясы, орташа квадраттық жуықтау нәтижелері қолданылып, сонымен қатар регрессиялық талдау жүргізілді. Абсолютті және салыстырмалы қателер есептелді. Стюденттің коэффициенті 0,95 сенімділік интервалында анықталды. Зерттеу нәтижелері бойынша ТОБЖ бойынша энергия тарату жүйесінің зертханалық үлгісінің пайдалы әсер ету коэффициенті (ПӘК) анықталды.

Түйін сөздер: Энергия көздері; оптикалық талшық; фотовольтаика; фотоэффект; жарық толқыны; энергия тарату.

Аннотация. В данной статье разрабатывается и исследуется лабораторный образец системы передачи энергии по волоконно-оптической линии связи (ВОЛС), позволяющей обеспечить электропитанием автономные электронные устройства сверхмалой мощности, находящихся на значительном расстоянии от источников энергии. Разрабатываемая система позволит отказаться от использования медных проводников и аккумуляторов для автономных

стационарных устройств, что сопряжено с определенными трудностями с точки зрения технической реализации. Результатом данного исследования является разработанный лабораторный образец, который позволяет измерять значения тока и напряжения в ветви фотоприемника. Использовался метод эквивалентного генератора, а также известные законы цепи с двумя выделенными узлами для активного двухполюсника. При анализе литературы, научных достижений и открытий в области исследования, была сформулирована собственная концепция исследований отличная от зарубежных аналогов. При проведении эксперимента фотоприемник находился в режиме холостого хода, короткого замыкания и был подключен к высокоомной нагрузке. На основании экспериментальных данных были построены вольт-амперные характеристики (ВАХ) при использовании источника излучения (лазера) мощностью 10 и 30 мВт. Приведены технические параметры и характеристики источника излучения и облучаемого кремниевого кристалла. Определена выходная электрическая мощность с использованием законов электротехники, включая закон Ома. Для обработки полученных результатов использовалась квадратичная интерполяция функции, результаты среднеквадратичного приближения, а также выполнен регрессионный анализ. Были рассчитаны абсолютная и относительная погрешности. Определен коэффициент Стьюдента при доверительном интервале 0,95. По результатам исследования определен коэффициент полезного действия (КПД) лабораторного образца системы передачи энергии по ВОЛС.

Ключевые слова: Источники энергии; оптическое волокно; фотовольтаика; фотоэффект; световая волна; передача энергии.

Abstract. In this article, a laboratory sample of an energy transmission system over a fiber-optic communication line is being developed and investigated, which makes it possible to provide power to autonomous ultra-low-power electronic devices located at a considerable distance from energy sources. The system being developed will make it possible to abandon the use of copper conductors and batteries for autonomous stationary devices, which is associated with certain difficulties from the point of view of technical implementation. The result of this study is a developed laboratory sample that allows measuring the values of current and voltage in the branch of the photodetector. The method of an equivalent generator was used, as well as the well-known laws of a circuit with two dedicated nodes for an active two-pole. When analyzing the literature, scientific achievements and discoveries in the field of research, a proprietary research concept was formulated that differs from foreign analogues. During the experiment, the photodetector was in idle, short-circuit mode and was connected to a high-resistance load. Based on experimental data, volt-ampere characteristics (VAC) were constructed using a radiation source (laser) with a power of 10 and 30 MW. The technical parameters and characteristics of the radiation source and the irradiated silicon crystal are given. The output electrical power is determined using the laws of electrical engineering, including Ohm's law. To process the results obtained, quadratic interpolation of the function, the results of the root-mean-square approximation were used, and regression analysis was also performed. Absolute and relative errors were calculated. The student's coefficient was determined with a confidence interval of 0.95. According to the results of the study, the efficiency of a laboratory sample of an energy transmission system over a fiber-optic communication line was determined.

Keywords: Energy sources; optical fiber; photovoltaics; photoelectric effect; light wave; energy transmission.

Кіріспе. Даму кезеңінің қазіргі сатысында энергия адам қызметінің барлық салаларында қолданылады. Қарапайым тұтынушылардың күнделікті өмірі, ұйымдар мен компаниялардың жұмысы, зауыттардың жұмыс істеуі және т.б. энергиямен жабдықтаусыз мүмкін емес. Бүгінгі күні электрмен жабдықтаудың көптеген шешімдері бар. Сондай шешімдердің бірі – талшықты-оптикалық байланыс жолы (ТОБЖ) арқылы тұтынушыларды энергиямен қамтамасыз ету. Энергияны ТОБЖ арқылы тарату энергиямен қамтамасыз ету саласындағы маңызды технологиялық аспектісі болып, зерттеудің өзекті және перспективалық бағыты болып табылады.

Энергия өткізгіш ретінде оптикалық талшықты (ОТ) пайдалану идеясы гипотезадан прототиптерге дейін соңғы 10 жылда белсенді түрде дамыды. АҚШ, Жапония, Еуропа және Қытай сияқты технологиялық дамыған елдердің ғалымдары энергетика секторын жаңғырту мақсатында ТОБЖ арқылы энергияны тасымалдаудың маңызды мәселесін шешуде, болашақ перспективада металл өткізгіштерді оптикалық өткізгіштерге ауыстыру

арқылы электр желілерін қауіпсіз ету.

Қазіргі уақытта бұл перспективалы және сыйымды ғылыми негізделген технология айтарлықтай қымбат және жаппай пайдалану үшін қолжетімді емес. Себептеріне жабдықтың қымбаттылығын, 800 м-ге дейінгі қашықтықпен шектелгендігін, тарату қуатының төменділігін айтуымызға болады. Сондықтан осы технологияны дамытудың жаңа әдістері мен құралдарын іздестіру қажеттілігі туындап отыр.

Әдеби дереккөздерге шолу және міндеттерді айқындау. Әдеби дереккөздер мен патенттерді талдау барысында Қазақстан Республикасының аумағында ұқсас зерттеулердің анықталмағаны байқалды, алайда шет елдерде оптикалық жолдар арқылы энергияны тасымалдаудың жоғары технологияларын, әдістері мен құралдарын дамытуға бағытталған зерттеулер жүргізілуде. Талшықты-оптикалық кабель арқылы электр энергиясын таратудың тәжірибелік үлгілері (прототиптері) мен технологиялары бар [1]. 960–990 нм толқын ұзындығында электр қуатын тарату үшін оқшауланған қуат көзін қамтамасыз ететін жоғары өнімділікті оптикалық қуат түрлендіргіштері әзірленді. Фототүрлендіргіштің шығыс қуатын арттыру жұмыстары жүргізілуде. Болашақта мақала авторлары фотодетектордың гетероқұрылымы дизайнын одан әрі оңтайландырды қолданып электрлік түрлендіруді оптикалық тиімділікті жақсарту арқылы шығыс қуатын арттыру мақсатында зерттеулер жүргізуді жоспарлап отыр [2]. Деректерді тарату жүйесін біріктіру мүмкіндігі бар арнаға 6 Вт қуатқа негізделген электр тарату жүйесінің тәжірибелік үлгі (прототипін) әзірлеу туралы ақпараттар да бар. Кәдімгі мыс жұптармен салыстырғанда, бұл технология келесідей бірегей артықшылықтарды қамтамасыз етеді: гальваникалық оқшаулау, электр тарату арнасына электромагниттік бөгелулер әсерінің болмауы, мыс кабельдерің болашақта талшықты-оптикалық өткізгіштермен ауыстыру перспективасы, электрлік қысқа тұйықталудың болмауы және өрт қауіпсіздігі [3]. Жоғары тиімділікке қол жеткізу үшін әртүрлі жоғалтуларды, соның ішінде жылудық жоғалтуларды азайту қажет. Фотодетектордың ауданы [3] қарастырылған ұсыныстарға сәйкес таңдалды. [4] Мақалада зерттеу мақсатында пайдаланылған жабдықтың сипаттамасы берілген. Аккумуляторды зарядтау контроллері мен лазер драйвері арасындағы кері байланысты қарапайым басқару контурына негізделген сәулелену көзінің қуатын интеллектуалды басқару тұжырымдамасы қалыптасты. Бұл ақпарат электр энергиясының тарату жүйесін құру үшін пайдаланылды. Мақалада [5] монохроматикалық (лазерлік немесе жарық диодты) жарықты электр энергиясына тиімді түрлендіруге арналған фотонды энергия түрлендіргіштері ұсынылған. Бұл құрылғылар тандемдік конфигурациялы тізбектей жалғанған бірнеше р-п өтпелі диодтардан тұрады. Басылымда [5] жоғары тиімділікті фотоэлектрлік энергия түрлендіргіштерін құруға және оларды оптикалық энергия тарату үшін қолдану мәселелеріне бағытталған зерттеу материалдары ұсынылады. Негізгі мәселе энергия тасымалдау жүйесінің құнын арттыратын қолданылатын жабдықтың жеткілікті күрделілігінде.

Зерттеу саласындағы қолда бар ғылыми жетістіктер мен жаңалықтарды талдай келе, шетелдік аналогтардан ерекшеленетін өзіндік зерттеу тұжырымдамасы қалыптасты, ол жайлы тиісті мақалаларда [7, 8] нақты сипатталған. Тік эпитаксиалды гетероқұрылымды сәулетті фотодетектордың (фотокабылдағыштың) және жоғары ток тығыздықты InP төсемді көп өтпелі фотоэлектрлік құрылғыларға арналған туннельдік диодтар аса жоғары тиімділігі қарастырылған. Алайда, бұл құрылғылардың төмен тиімділігін ғана емес, сонымен қатар оларды пайдалану мен дамытуға кедергі келтіретін жоғары құнын атап өтуге болады. Ағымдағы жағдай оптикалық талшық арқылы энергия тарату жүйесінің ең тиімді және арзан элементтерін іздеу арқылы мәселелерді шешуді талап етеді.

Ондаған ватт қуатты алу және ондаған километр арақашықтықты қамтамасыз ету үшін

жаңа фототүрлендіргіштерді әзірлеумен қатар олардың тиімділігін арттыру жолдарын табу қажет. [9]. Мақалада энергияны тасымалдау арнасының қуатын арттыру үшін фототүрлендіргіштерді (фотодетекторларды) тізбектей және параллель қосу қарастырылады. Ток бойынша келістірілген бірнеше лазерлерді пайдалану маңыздандырылады. Талшықты-оптикалық байланыс жолы (ТОБЖ) арқылы энергияны тарату автономды тұтынушыларды электрмен қамтамасыз ету талшықты-оптикалық техника мен технологияның аз зерттелген саласы болып табылады [10]. Келесі авторлар [11], [12] өз жұмыстарында GaAs лазерлерінің қуат түрлендіргіштеріне арналған AlGaAs градиенттік толқын өткізгіштерінің зерттеу нәтижелерін жариялаған. Болашақта аталған лазерлерді аса аз қуатты электронды құрылғыларды (төмен қуатты) қоректендіру үшін пайдаланылу мүмкін. Бұл зерттеулер тек зертханалық эксперименттер шектеледі және өнеркәсіптік қолдану жоспарланбайды. Сонымен қатар, 1310 нм толқын ұзындығында лазер жарықтандырудан сәулені ұстау үшін нанокұрылымды кері айналы ультра жұқа монохроматикалық фотонды қуат түрлендіргіштерін зерттеу де үлкен перспективалы бағыт болып табылады [13]. Фототүрлендіргіш тудыратын кернеуді жоғарлату саласындағы маңызды жетістік 14 В-қа тең шама болып табылады, ол энергияны тарату арнасының қуатын айтарлықтай арттырады [14]. Жүргізілген патенттік іздеу де бұл бағыттың жаңа және аз зерттелгенін көрсетті. Патенттердің едәуір бөлігі соңғы 10 жылға тиесілі. Мысалы, 2015 жылы АҚШ жарияланған патенті айтуымызға болады. Патент OT арқылы электр энергиясын тарату жүйесіне арналған оптикалық энергияны электр энергиясына түрлендіргішіне алынған [15]. Әлемде OT арқылы энергияны тарату үшін қарастырылған жүйелерде қолданылатын жоғары өнімділік пен сенімділікке ие қуатты және жоғары жарықтықты жартылай өткізгіш лазерлік диодтардың жартылай өткізгіштерді өндіру технологиялары үнемі дамып келеді [16]. Толқын ұзындығы бойынша бөлу арқылы бір OT арқылы энергия мен ақпаратты бір уақытта таратуға бағытталған әзірлемелер үлкен қызығушылық тудырып отыр [17].

Ұсынылған мақаланың негізін OT бойымен жарық толқынының таралу қасиеттерін зерттеуге бағытталған алдын ала зерттеулердің жинақталған материалы құрайды, оның негізінде негізгі гипотеза [18], [19] қалыптасты.

Жоғарыда аталған дереккөздерді зерттей келе, энергия тарату арнасының тиімділігі төмен деген қорытындыға келуге болады. Тиісінше, шығындарды азайту және электр энергиясын тарату тиімділігін арттырудың жаңа шешімдерін іздеу, жаңа техникалық және жоғары технологиялық шешімдерді іздеуді талап ететін жеткілікті өзекті ғылыми мәселе болып табылады.

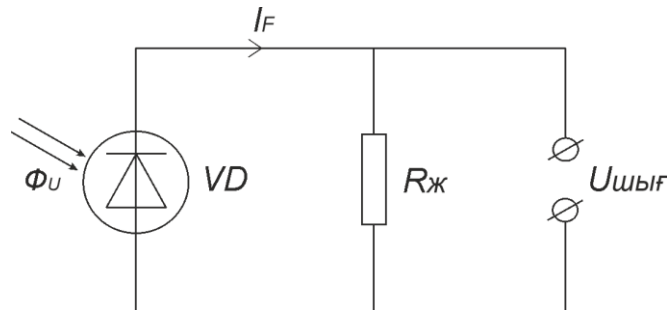
Мәселерді айқындау энергияны тарату құралы ретінде оптикалық талшықты пайдалануды зерттеуден, жүйенің ПӘК арттыру үшін оның конструктивтік (құрылымдық) ерекшеліктерін зерттеуден тұрады.

Зерттеудің мақсаты мен міндеттері. Зерттеудің мақсаты энергия көздерінен айтарлықтай қашықтықта орналасқан автономды аса төмен қуатты тұтынушыларды электрмен қамтамасыз ету үшін ТОБЖ арқылы энергияны тарату жүйесінің тәжірибелік үлгісін (прототипін) әзірлеу болып табылады.

Осы мақсатқа жету үшін келесі міндеттер шешіледі:

- қойылған мәселе бойынша қажетті теориялық зерттеулер жүргізілді;
- ағымдағы зертханалық үлгінің жеке құрылымдық бөліктерін әзірлеудің жүйелі тәсілі негізінде кешенді ғылыми зерттеулер жүргізілді;
- қолданыстағы зертханалық үлгісі әзірленді, оның негізінде қажетті эксперименттік зерттеулер жүргізілді;
- талдап, нәтижелерді талқылап, қажетті қорытындылар жасалды.

Материалдар және зерттеу әдістері. Теориялық зерттеулер. Фотокабылдағыш болып КТ 808А транзисторының р-п өткелінің кремний пластинасы болып табылады [20]. Толқын ұзындығы 650 нм болатын лазер сәулесі оның бетіне түскенде оның шығыс шықпасында I_F фототогы пайда болады. VD фотоэлектрлік модульдері де осыған ұқсас жұмыс істейді, яғни оң зарядты (анодты) шықпадан теріс зарядты (катодты) шықпаға R_H жүктеме кедергісі арқылы ағады, оған $U_{шығ}$ (1-сурет) жүктеме кернеуі түседі.



1-сурет. Тұрақты ток генерациясының сұлбасы

Фотоэффектінің белгілі заңдары мен А. Эйнштейннің теңдеулерін пайдалана отырып, тұйықталмаған сыртқы тізбек режимінде (жүктеме кедергісі R_H ескерілмеген) р-п өткелінен өтетін тура тоқты [21] келесі өрнек арқылы анықтауға болады:

$$J_T = J_0 * \left(\exp\left(\frac{AeU}{kT}\right) - 1 \right). \quad (1)$$

Ажыратылған жүктемеде жалпы ток келесіге тең:

$$J_H = J_T - J_\Phi = J_0 * \left(\exp\left(\frac{AeU}{kT}\right) - 1 \right) - J_\Phi, \quad (2)$$

өйткені р-п өткелінің ішкі тогы мен фототок қарама-қарсы белгілерге ие. Бос жүріс режимде, яғни тізбекте жүктеме жоқ және тізбек тұйықталмаған кезде $J_H=0$.

Бос жүріс режимінде кернеуді келесідей көрсетуге болады:

$$U = U_{xx} = \frac{kT}{Ae} * \ln\left(\frac{J_\Phi}{J_0} + 1\right), \quad (3)$$

мұндағы: k – Больцман тұрақтысы ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К = $0,86 \cdot 10^{-4}$ эВ/К), e – элементарлы заряд ($e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл).

Жүктеме R_H жағдайында анықталатын P қуат:

$$P = I * U = \left(J_0 * \left(\exp\left(\frac{AeU}{kT}\right) - 1 \right) - J_\Phi \right) * U. \quad (4)$$

P қуаты J және U кейбір мәндері бар тіктөртбұрыштың ауданына сәйкес келеді. Шеткі $J_{кз}$, U_{xx} нүктелерінде қуат $P = 0$, демек $P(J, U)$ қуат қисығымен сипатталады. (4) теңдеу токқа немесе кернеуге байланысты максимумға ие болады.

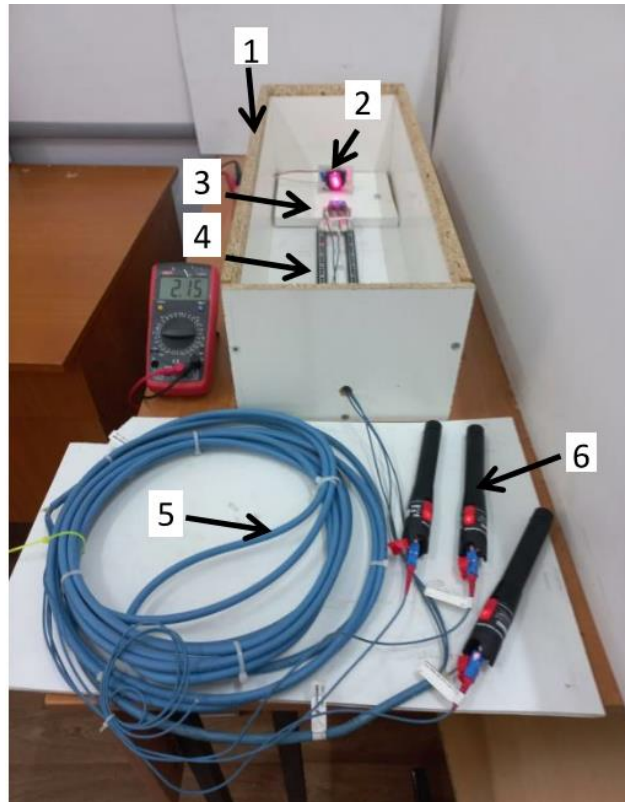
Теңдеуді шешу:

$$\left(\frac{dP}{dU} \right) \Big|_{J=J_{max}, U=U_{xx}} = 0, \quad (5)$$

Сонда төмендегі теңдеу жүйесін аламыз:

$$\begin{cases} J_{max} = -\frac{J_{\Phi}}{1+\frac{1}{A*U_{max}}} \approx -J_{кз} * \left(1 - \frac{1}{A*U_{max}}\right) \\ U_{max} = \frac{kT}{e} * \ln\left(\frac{\frac{J_{\Phi}+1}{J_0}}{1+A*U_{max}}\right) \approx U_{xx} - \frac{kT}{e} * \ln(1 + A * U_{max}) \\ P_{max} \approx J_{кз} * \left[U_{xx} - \frac{kT}{e} * \ln(1 + A * U_{max}) - \frac{kT}{e}\right] \end{cases} \quad (6)$$

Экспериментті зерттеулер. Экспериметті өткізу үшін зертханалық стенд үлгісі әзірленді (2-сурет).



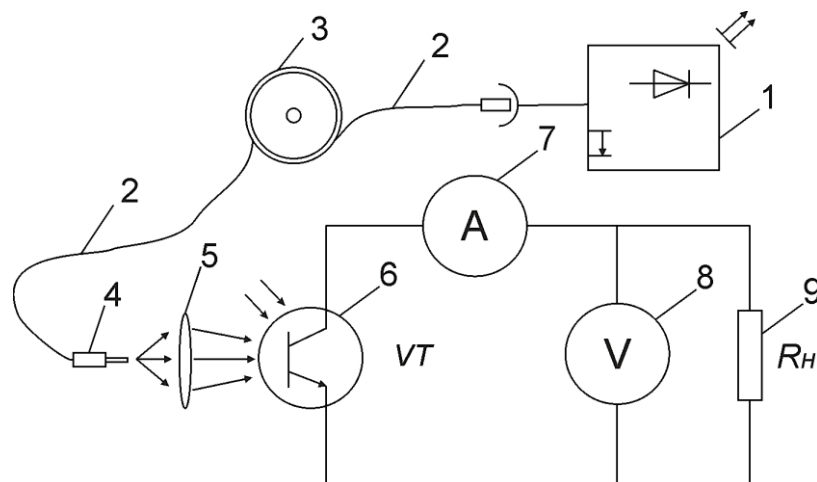
2-сурет. Зертханалық стенд үлгісінің сыртқы көрінісі: 1 – қақпақты ойық қорап; 2 – кремний пластиналы фотоқабылдағыш; 3 – оптикалық телекоммуникациялық конвектор (SC типті UPC әрленген); 4 – сәулені фокустайтын бағыттағыш; 5 – оптикалық талшық; 6 – сәулелену көзі (лазер)

Зертханалық стендті құру процесінде эксперименттің қажетті жиілігін қамтамасыз етуге және фотоэлементтің кремний пластинасына күндізгі жарықтың түсуін болдырмауға мүмкіндік беретін сәттерді есепке алынды. Қорап қақпақпен жабылады, фотоқабылдағыш арнайы ойықтарға орнатылады, бұл оның толық көлеңкеленуін қамтамасыз етеді. Сәулеленуді фотоқабылдағыштың кремний пластинасына фокустау үшін бағыттаушы жолақтарға орнатылған диаметрі 5 см болатын линза қолданылды. Бұл қажетті фокус ұзындығын орнатуға мүмкіндік береді. Оптикалық талшық тәжірибе кезінде қорапқа мөлдір емес тығыздағышпен жабылған тесік арқылы кіреді. Фотоқабылдағыштың өткізгіштері бүйірлік тесік арқылы шығып, өлшеу аспаптарына қосылады. Эксперименттерді орындау кезінде ток және кернеу параметрлері фотоқабылдағыштың бір тармағында ғана

өлшенді. Эквивалентті генератор әдісі, сондай-ақ Тевенин – Гельмгольц теоремасы арқылы эквивалентті генераторға түрлендіруге болатын екі белгіленген түйінді активті екіұшты үшін белгілі тізбек заңдары қолданылды. Энергия активті екіұштыдан пассивтіге таратылды, бұл мақсатта 1 Вт қуатты жоғары кедергілі резистор пайдаланылды.

3-суретте фотоқабылдағыштың параметрлерін өлшеу сұлбасы берілген.

Эксперимент барысында фотоқабылдағыштың келесідей режимдерде жұмысы бақыланып зерттеулер жүргізілді: қысқа тұйықталу, бос жүріс және жоғары кедергілі жүктемеге қосылған. Алынған нәтижелерге сүйене отырып, оның вольт – амперлі сипаттамалары (BAC) құрастырылды, сонымен қатар электр техникасының белгілі заңдарын пайдаланып, соның ішінде Ом заңы арқылы қуат анықталды. Фотоқабылдағыш тұрақты ток тізбегінде жұмыс істеді. Сәулелену көзі ретінде ТОВЖ тексеруге арналған тестердегі ONTi (Қытай) қаттыденелі жартылай өткізгіш лазері қолданылды. Аталған аспап төрт мәнде (5, 10, 20, 30 мВт) қадаммен реттелетін, қуатты теңшей алатын визуалды локатор деп те аталады. Лазер литий-ионды аккумуляторлардан (Li-ion) қуат алады. Қызыл түсті лазердегі толқын ұзындығы 650 нм, ауытқуы 5 нм-ден аспайды. Лазерлік пульсация фотоқабылдағышқа жіберілді және осциллографтың көмегімен тіркелді. Аталған флукуация мәні өте аз, сондықтан нәтижелердің дәлдігіне әсер ететін факторлар есебінен алынып тасталды. Тәжірибеде G 652 стандартты бір модальды оптикалық талшық пайдаланылды. Энергия тарату арнасының ұзындығын ұлғайту мақсатында ұзындығы катушка (орауыш) қолданылды. Оған 1200 метр G 652 стандартты бір модальды оптикалық талшығы оралған. Оптикалық талшық UPC әрленген SC типті телекоммуникациялық қосқышпен шектелген, оның шығысынан жарық дағы фокустау линзасының бетіне, содан кейін фотоқабылдағыштың кремний пластинасына түседі. Катушка мен сәулелену көзін қосу үшін FC/SC типті стандартты телекоммуникациялық қосқыштар және бір типті адаптерлер қолданылады.



3-сурет. Фотоқабылдағыштың параметрлерін өлшеу сұлбасы: 1 – оптикалық ағытпалы қосқышты жартылай өткізгішті лазер, 2 – оптикалық талшық, 3 – оптикалық талшықты орауыш (катушка), 4 – оптикалық ағытпалы қосқыш, 5 – фокустаушы линза, 6 – фотоқабылдағыш, 7 – амперметр, 8 – вольтметр, 9 – жоғары кедергілі жүктеме

Тізбек тогын өлшеу үшін келесі сипаттамалары бар Fluke 87V мультиметрі (АҚШ) пайдаланылды: токты өлшеу қателігі: $\pm 0,2\%$, рұқсатты: 0,1 мкА. Температура өлшеу қателігі $\pm 0,05\%$ болатын Fluke 51 (Fluke, АҚШ) контактілі термометрімен және жедел

тексерулер үшін қолданылатын ± 2 °C дәлдігімен өнеркәсіптік жанаспайтын Smart Sensor AR320 термометрімен өлшенді. Тәжірибелер кезінде кремний кристалының температурасы 23-25 °C аралығында болды. Кремний пластинасы дуралюминий радиаторына орналастырылды. Лазердің жұмыс режимі қысқа мерзімді болғандықтан оптикалық тізбек элементтерінің қызуы байқалмады, ал температура тұрақты болды. Кернеуді өлшеу үшін сезімталдығы тік 1 мВ/бөл~ 20 В/бөл және өткізу қабілеті 50 МГц құрайтын UTD2052CEX (UNIT Гонконг) цифрлық осциллографы қолданылды.

Маңызды сәт – талшықты-оптикалық өткізгіштің ПӘК анықтау болып табылады. Есептеу әдісі келесідей: фотоқабылдағыштың жүктемеге берген максималды қуатының жұмыс бетіне перпендикуляр түсетін лазерлік сәулелену қуатына қатынасы ескеріледі:

$$\eta = V_p * \frac{I_p}{P_c} * 100 \% , \quad (7)$$

мұндағы: V_p және I_p – жүктемеге берілетін максималды қуаттағы жұмыс нүктесіндегі кернеу мен ток, P_c – фотоқабылдағыштың жұмыс бетіне түсетін сәулелену қуаты.

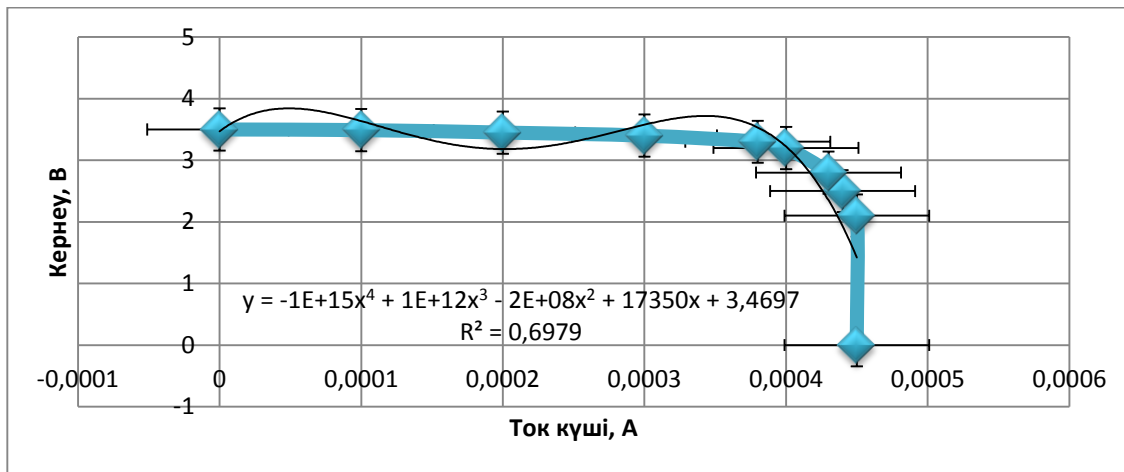
Фотоқабылдағыштың вольт-амперлі сипаттамасының (BAC) толтыру коэффициенті (Fill Factor, FF) қысқа тұйықталу тогы $I_{kз}$ және бос жүріс кернеуі $U_{хх}$ параметрлерін ескере отырып таңдалады. Фотоқабылдағыштың шығыс қуаты $U_{хх}$ және $I_{kз}$ жағдайында нөлге тең болатынын ескеру қажет. BAC-ның толтыру коэффициентін 0,7-ге тең деп қабылдаймыз. Тәжірибеде қуат тарату жүйесі ток пен кернеудің келесідей комбинациясында жұмыс істейді: максималды сәулелену деңгейінде жеткілікті қуат өндірілген және MPP (Maximum Power Point) максималды қуат нүктесінде V_p (номиналды кернеу) және I_p (номиналды ток) параметрлеріне сәйкес келетін жағдайында. Дәл осы нүктеде фотоқабылдағыштың номиналды қуаты мен ПӘК анықталады.

Нәтижелері және оларды талқылау. Теориялық зерттеулердің нәтижелері р-п өткелінің кремний пластинасы болып табылатын фотоқабылдағыш параметрлерінің тәуелділігін орнату табылады. Алынған теңдеулер жүйесі (6) фотоқабылдағыш бетіне 650 нм жарық толқыны түскенде BAC графигі параметр шектеулері бар екенін түсіндіреді:

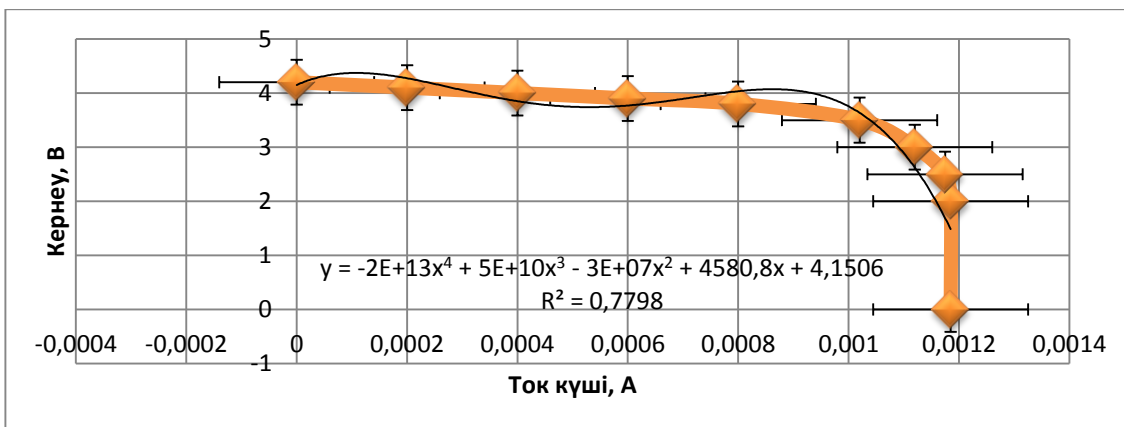
$$J_{max} < J_{кз}, U_{max} < U_{хх}, P_{max} < J_{кз} * U_{хх}.$$

Осыған сәйкес, $P_{max} \approx (0.7 \div 0.8) * J_{кз} * U_{хх}$.

Зертханалық стендті пайдаланып эксперименттік зерттеулерді жүргізу барысында жаңа нәтижелер алынып, өңделіп, лазердің келесідей сәулелену қуаттары ескеріліп (10, 20, 30 мВт), фотоқабылдағыштың BAC графиктері салынды. 4 және 5-суреттерде 10 және 30 мВт сәулелену қуаттары үшін BAC құру нәтижелері көрсетілген. R2 жуықтау дәлдігі мәнін шығару арқылы төртінші дәрежелі көпмүшенің жуықтауы орындалып, сонымен қатар қателер анықталып, тренд сызығы тұрғызылды.

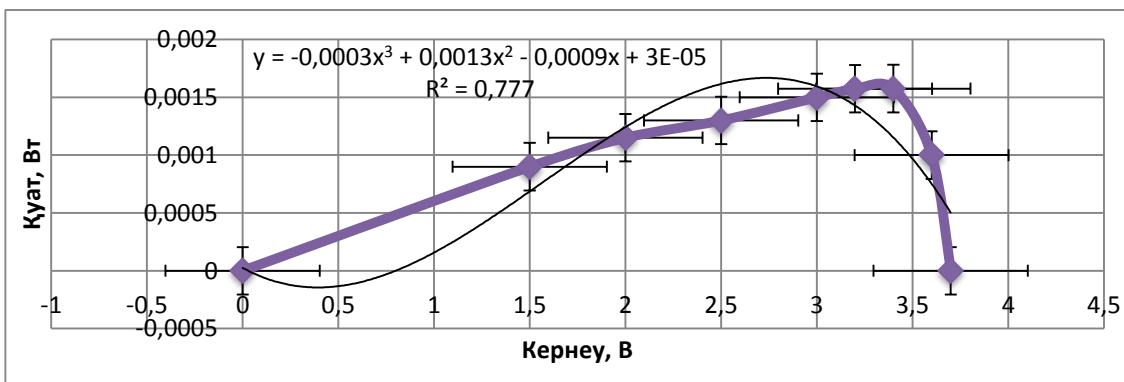


4-сурет. Лазердің сәулелену қуаты 10 мВт жағдайындағы ВАС графигі

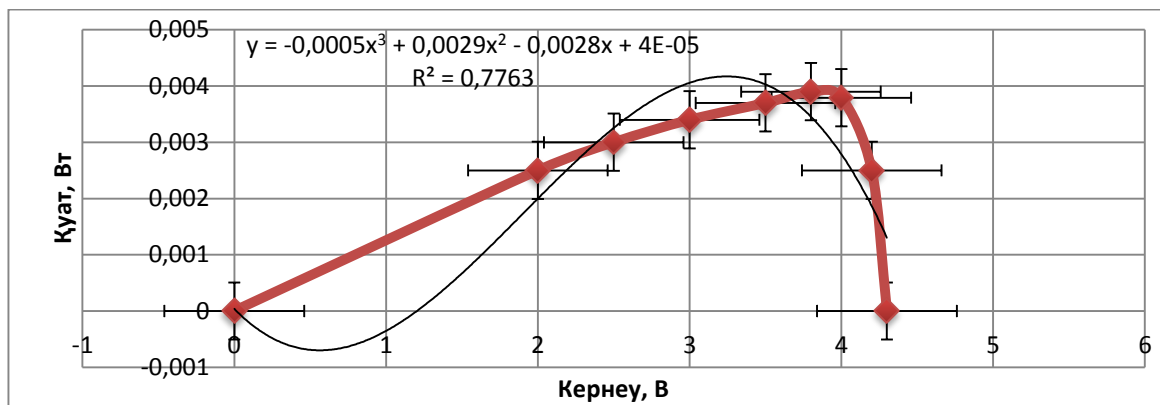


5-сурет. Лазердің сәулелену қуаты 30 мВт жағдайындағы ВАС графигі

6 және 7-суреттерде 10 және 30 мВт сәулелену қуаттарында фотоқабылдағыштың шығыс шықпасындағы электр қуатының графиктері көрсетілген. Мұнда да R2 жуықтау дәлдігі мәнін шығару арқылы төртінші дәрежелі көпмүшенің жуықтауы орындалып, сонымен қатар қателер анықталып, тренд сызығы тұрғызылды.



6-сурет. Лазердің сәулелену қуаты 10 мВт жағдайындағы қуаттың кернеуге тәуелділігінің графигі



7-сурет. Лазердің сәулелену қуаты 30 мВт жағдайындағы қуаттың кернеуге тәуелділігінің графигі

Эксперименттік деректер Microsoft Excel (АҚШ) кестелік процессор құрылғылары арқылы өңделді. Функцияның квадраттық интерполяциясы (тұтас сызық) және орташа квадраттық жуықтау нәтижелері (үзік сызық), регрессиялық талдау жүргізілді. Алынған аппроксимация сәйкестігі Microsoft Excel (АҚШ) және Wolframalpha (АҚШ) компьютерлік бағдарламалары арқылы тексерілді.

Сандық зерттеу Wolframalpha (АҚШ) бағдарламасының көмегімен жүргізілді, аталған құрал эксперименттік нәтижелерді өңдеуде интерактивті жүйе болып табылады және деректер массивтерімен жұмыс істеуге бағытталған. Бағдарламаны пайдалана отырып, абсолютті және салыстырмалы қателер есептеліп, Стюдент коэффициенті 0,95 сенімділік интервалымен анықталды.

Зерттеу нәтижелері бойынша аса төмен қуатты автономды тұтынушыларды электрмен қамтамасыз ету үшін талшықты-оптикалық өткізгіш арқылы энергияны тарату жүйесінің тиімділігі анықталды. 10 мВт лазерлік сәулелену қуаты кезінде ПӘК 15 %, ал 30 мВт үшін оның мәні 13 % жетеді. Энергияны оптикалық талшық (ОТ) арқылы тарату кезінде фотоқабылдағыш бөлетін максималды электр қуаты 10 мВт лазерлік жұмыс режимінде 0,001575 Вт құраса, 30 мВт лазерлік жұмыс режимінде 0,003792 Вт болды. Бұл қуат кез келген электрондық құрылғыларды, мысалы, ток тұтынуы 6,5 мА және кернеуі 1,86 В болатын төмен қуатты 12 мВт жарық диодты да қуаттандыру үшін жеткіліксіз. ОТ арқылы энергия тарату жүйелерінің төмен ПӘК атап өтуімізге болады.

Жұмыс зерттеудің бастапқы кезеңінде және тиімділігін арттыру тұрғысынан одан әрі дамытуды талап етеді. 1200 м қашықтыққа бір модалы оптикалық талшық арқылы электр қуатын тарату фактісі тіркелді. Өзек диаметрі 9 мкм және қабықшасы 125 мкм болатын бір модалы оптикалық талшық 1 Вт-тан жоғары қуатты тарату үшін қолайлы емес екенін атап өтуге болады. Бұл жағдайда көпмодалы талшықты немесе бірнеше параллельді бір модалы оптикалық талшықтарды пайдалану қызығушылық тудырады. Көпмодалы оптикалық талшықта оның өзегі арқылы таралатын оптикалық сәулеленудің өшу параметрі жоғары болғандықтан, оны пайдалану бір километрге дейінгі қашықтықпен шектеледі, ал бірнеше бір модалы талшықтарды пайдалану тарату сұлбасын күрделендіреді, өйткені ТОВЖ-ның кірісі мен шығысында оптикалық бөлгіштер (сплиттерлер) орнату қажеттілігі туындайды.

Оптикалық бөлгіш (сплиттер) қуаттың белгілі бір деңгейін жоғалтады. Лазерлік қуатты арттыру кіріс шықпасындағы оптикалық талшықтың қызуын тудырады, бұл сонымен қатар қуат тарату жүйесінің жұмысында маңызды мәселе болуы мүмкін. Сондай-ақ линзаны пайдаланып фотоқабылдағыштың бетіне сәулені фокустау мәселесі де бар, өйткені бұл да қуаттың жоғалуына және ПӘК төмендеуіне әкеледі. Жоғарыда айтылғандардың негізінде талшықты-оптикалық өткізгіш арқылы электр энергиясын тарату жүйесін әлі де нақтылау қажет.

Қорытынды. Қолданылатын жарық толқындарының диапазонын 5 нм аспайтын ауытқумен 650-ден 1625 нм-ге дейін кеңейту жоспарлануда. Фототүрлендіргіштің пульсациясын тіркеу үшін осциллограф қолданылады. Экспериментте G.651 және G.652 стандартындағы оптикалық талшықты пайдалынады.

Қойылған міндеттерді шешу нәтижесінде қуаттылығы 1 Вт жоғары, 30 км-ден астам қашықтыққа көп арналы жүйе арқылы 650-ден 1625 нм-ге дейінгі кең диапазонды қамтитын энергияны жарық толқыны түрінде тарату жүйесін әзірлеуге мүмкіндік беретін технология әзірленеді. 10 Вт-тан жоғары қуатты тарату технологиясының негізі қаланады, ондай жүйелерде арналар мен фототүрлендіргіштердің саны тізбектей-параллель сұлбамен қосу арқылы арттырылған, ал жұмысы кіріктірілген микроконтроллер көмегімен тұрақтандырылған. Бұл жағдайда ақпарат бір уақытта объекіден объектіге таратылады. Бұл жарылыс қаупі бар ортада жұмыс істеуге қабілетті ұзартылған объектілердің техникалық жай-күйін бақылау және мониторинг жасау үшін энергия-пассивті жүйелердің жаңа буынын құруға мүмкіндік береді. Төмен қуатты тұтынушыларға электр энергиясын тарату үшін оптикалық талшықты пайдалану әдеттегі мыс жұппен салыстырғанда бірқатар артықшылықтарды қамтамасыз етеді, мысалы, гальваникалық оқшаулау, электр тарату арнасында электромагниттік бөгелулердің болмауы, мыс кабельдердің талшықты-оптикалық өткізгіштері бар кабельдерге ауыстырудың болашақ перспективасы, электрлік қысқа тұйықталудың болмауы, өрт қауіпсіздігі бойынша талаптарға жауап беретіндігін айтуымызға болады. Талшықты-оптикалық жол негізінде электрмен жабдықтау жүйесін дамыту бойынша зерттеулердің нәтижелерін авторлар алдағы бірлескен жұмыстарда ұсынады.

Әдебиеттер тізімі

1. Передача мощности по оптоволокну. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://infiber.ru/products/power-over-fiber.html> (дата обращения: 09.01.2023).
2. S. Fafard, D. Masson, J-G Werthen, J. Liu, Ta-Ch Wu, Ch Hundsberger, M. Schwarzfischer, G. Steinle, Ch Gaertner, Cl Piemonte and M Weigert. Power and spectral range characteristics for optical power converters. *Energies* 2021, 14, 4395. – URL: <https://doi.org/10.3390/en14154395>.
3. Helters, H.; Armbruster, C.; von Ravenstein, M.; Derix, D.; Schöner, C. 6-W Optical Power Link with Integrated Optical Data Transmission. *IEEE Trans. Power Electron.* 2020, 35, 7904. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8962158>.
4. Matthias Haid, Cornelius Armbruster, David Derix, Christian Schöner, Henning Helters. 5-W optical power link with generic voltage output and modulated data signal. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, Heidenhofstr. 2, 79110 Freiburg, Germany.
5. Wilkins, M.; Ishigaki, M.; Provost, P.-O.; Masson, D.; Fafard, S.; Valdivia, C.E.; Dede, E.M.; Hinzer, K. Ripple-free boost-mode power supply using photonic power conversion. *IEEE Trans. Power Electron.* 2018, 34, 1054. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8370723>.
6. Fafard, S.; Masson, D.; Werthen, J.G.; Hundsberger, C.; Schwarzfischer, et al. High-Efficiency Photovoltaic Power Converters and Application to Optical Power Transmission. 26th Microoptics Conference (MOC), Hamamatsu, Japan, 26–29 Sept. 2021. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9598073>.
7. Fafard, S.; York, M.C.; Proulx, F.; Valdivia, C.E.; Wilkins, M.M.; Arès, R.; Aimez, V.; Hinzer, K.; Masson, D.P. Ultrahigh efficiencies in vertical epitaxial heterostructure architectures. *Appl. Phys.*

- Lett. 2016, 108, 071101. – URL: <https://doi.org/10.1063/1.4941240>.
8. Beattie, M.N.; Valdivia, C.E.; Wilkins, M.M.; Zamiri, M.; Kaller, K.L.C.; Tam, M.C.; Kim, H.S.; Krich, J.J.; Wasilewski, Z.R.; Hinzer, K. High current density tunnel diodes for multi-junction photovoltaic devices on InP substrates. *Appl. Phys. Lett.* 2021, 118, 062101. – URL: <https://doi.org/10.1063/5.0036053>.
 9. Wagner, L.; Reichmuth, S.K.; Philipps, S.P.; Oliva, E.; Bett, A.W.; Helmers, H. Integrated series/parallel connection for photovoltaic laser power converters with optimized current matching. *Prog. Photovolt. Res. Appl.* 2020, 29, 172. – URL: <https://doi.org/10.1002/pip.3353>.
 10. Komuro, Y.; Honda, S.; Kurooka, K.; Warigaya, R.; Tanaka, F.; Uchida, S. A 43.0% efficient GaInP photonic power converter with a distributed Bragg reflector under high-power 638 nm laser irradiation of 17 W cm⁻². *Appl. Phys. Express* 2021, 14, 052002. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.35848/1882-0786/abf31c>.
 11. Panchak, A.; Khvostikov, V.; Pokrovskiy, P. AlGaAs gradient waveguides for vertical p/n junction GaAs laser power converters. *Opt. Laser Technol.* 2021, 136, 106735. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106735>.
 12. Zhao, Y.; Li, S.; Ren, H.; Li, S.; Han, P. Energy band adjustment of 808 nm GaAs laser power converters via gradient doping. *J. Semicond.* 2021, 42, 032701. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1674-4926/42/3/032701>.
 13. Nouri, N.; Valdivia, C.E.; Beattie, M.N.; Zamiri, M.S.; Krich, J.J.; Hinzer, K. Ultrathin monochromatic photonic power converters with nanostructured back mirror for light trapping of 1310-nm laser illumination. In *Physics, Simulation, and Photonic Engineering of Photovoltaic Devices X*; 116810X (5 March 2021). – URL: <https://doi.org/10.1117/12.2584689>.
 14. Fafard, S.; York, M.C.A.; Proulx, F.; Wilkins, M.; Valdivia, C.E.; Bajcsy, M.; Ban, D.; Arès, R.; Aimez, V.; Hinzer, K.; et al. Ultra-efficient N-junction photovoltaic cells with Voc > 14 V at high optical input powers. In *Proceedings of the IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference, Portland, OR, USA, 5-10 June 2016*. – P. 2374. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7750065>.
 15. Fafard, S.; Masson, D.P. US 20150162478A1-Transducer to Convert Optical Energy to Electrical Energy. U.S. Patent, Jun. 11, 2015. – URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/d1/11/5d/9773cd63b60f70/US20150162478A1.pdf>.
 16. Yamagata, Y.; Yamada, Y.; Kaifuchi, Y.; Nogawa, R.; Morohashi, R.; Yamaguchi, M. Performance and reliability of high power, high brightness 8xx-9xx nm semiconductor laser diodes. In *Proceedings of the 2015 IEEE High Power Diode Lasers and Systems Conference (HPD), Coventry, UK, 14–15 October 2015*; pp. 7–8. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7439668>.
 17. Haid, Matthias & Armbruster, Cornelius & Derix, David & Schöner, Christian & Helmers, Henning. (2019). 5 W Optical Power Link with Generic Voltage Output and Modulated Data Signal. – URL: https://www.researchgate.net/publication/332671391_5_W_Optical_Power_Link_with_Generic_Voltage_Output_and_Modulated_Data_Signal.
 18. Kovtun, A.A. Mekhtiyev A.D., Yugay, V.V. Aimagambetova, R.Z. Alkina, A.D., Neshina E. G. Research of mechanical stress at tension of quartz optical fiber (QOF). *Metalurgija* 60 (2021) 1-2, pp. 571-574. – URL: <https://hrcak.srce.hr/246106>.
 19. Mekhtiyev A.D., Soldatov A.I., Neshina Y.G., Alkina A.D., Madi P.Sh. The working roof rock massif displacement control system. *N E W S of the Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan*, Volume 5, Number 449 (2021), pp. 68-76. – URL: <https://doi.org/10.32014/2021.2518-170X.100>.
 20. Справочники. [Электронный ресурс] / Режим доступа: – URL: http://electronic.com.ua/spravochniki/Tranzistorq_otehestvennqe/Tranzistorq_otehestvennqe_bol%60woy_moschnosti_nizkohastotnqe_KT_800-819.html (дата обращения: 18.01.2023).
 21. Юрченко А.В., Мехтиев А.Д., Алькина А.Д. Пути повышения эффективности солнечных электростанций. Монография / Карагандинский государственный технический университет. – Караганда: Изд-во КарГТУ, 2017. – 181 с.

References

1. Peredacha moshchnosti po optovoloknu. [Elektronnyj resurs] / Rezhim dostupa: <http://infiber.ru/products/power-over-fiber.html> (accessed: 09/01/2023).
2. S. Fafard, D. Masson, J-G Werthen, J. Liu, Ta-Ch Wu, Ch Hundsberger, M. Schwarzfischer, G.

- Steinle, Ch Gaertner, Cl Piemonte and M Weigert. Power and spectral range characteristics for optical power converters. *Energies* 2021, 14, 4395. – URL: <https://doi.org/10.3390/en14154395>.
3. Helmers, H.; Armbruster, C.; von Ravenstein, M.; Derix, D.; Schöner, C. 6-W Optical Power Link with Integrated Optical Data Transmission. *IEEE Trans. Power Electron.* 2020, 35, 7904. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8962158>.
 4. Matthias Haid, Cornelius Armbruster, David Derix, Christian Schöner, Henning Helmers. 5-W optical power link with generic voltage output and modulated data signal. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, Heidenhofstr. 2, 79110 Freiburg, Germany.
 5. Wilkins, M.; Ishigaki, M.; Provost, P.-O.; Masson, D.; Fafard, S.; Valdivia, C.E.; Dede, E.M.; Hinzer, K. Ripple-free boost-mode power supply using photonic power conversion. *IEEE Trans. Power Electron.* 2018, 34, 1054. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8370723>.
 6. Fafard, S.; Masson, D.; Werthen, J.G.; Hundsberger, C.; Schwarzfi; et al. High-Efficiency Photovoltaic Power Converters and Application to Optical Power Transmission. 26th Microoptics Conference (MOC), Hamamatsu, Japan, 26-29 Sept. 2021. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9598073>.
 7. Fafard, S.; York, M.C.; Proulx, F.; Valdivia, C.E.; Wilkins, M.M.; Arès, R.; Aimez, V.; Hinzer, K.; Masson, D.P. Ultrahigh efficiencies in vertical epitaxial heterostructure architectures. *Appl. Phys. Lett.* 2016, 108, 071101. – URL: <https://doi.org/10.1063/1.4941240>.
 8. Beattie, M.N.; Valdivia, C.E.; Wilkins, M.M.; Zamiri, M.; Kaller, K.L.C.; Tam, M.C.; Kim, H.S.; Krich, J.J.; Wasilewski, Z.R.; Hinzer, K. High current density tunnel diodes for multi-junction photovoltaic devices on InP substrates. *Appl. Phys. Lett.* 2021, 118, 062101. – URL: <https://doi.org/10.1063/5.0036053>.
 9. Wagner, L.; Reichmuth, S.K.; Philipps, S.P.; Oliva, E.; Bett, A.W.; Helmers, H. Integrated series/parallel connection for photovoltaic laser power converters with optimized current matching. *Prog. Photovolt. Res. Appl.* 2020, 29, 172. – URL: <https://doi.org/10.1002/ppp.3353>.
 10. Komuro, Y.; Honda, S.; Kurooka, K.; Warigaya, R.; Tanaka, F.; Uchida, S. A 43.0% efficient GaInP photonic power converter with a distributed Bragg reflector under high-power 638 nm laser irradiation of 17 W cm⁻². *Appl. Phys. Express* 2021, 14, 052002. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.35848/1882-0786/abf31c>.
 11. Panchak, A.; Khvostikov, V.; Pokrovskiy, P. AlGaAs gradient waveguides for vertical p/n junction GaAs laser power converters. *Opt. Laser Technol.* 2021, 136, 106735. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106735>.
 12. Zhao, Y.; Li, S.; Ren, H.; Li, S.; Han, P. Energy band adjustment of 808 nm GaAs laser power converters via gradient doping. *J. Semicond.* 2021, 42, 032701. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1674-4926/42/3/032701>.
 13. Nouri, N.; Valdivia, C.E.; Beattie, M.N.; Zamiri, M.S.; Krich, J.J.; Hinzer, K. Ultrathin monochromatic photonic power converters with nanostructured back mirror for light trapping of 1310-nm laser illumination. In *Physics, Simulation, and Photonic Engineering of Photovoltaic Devices X*; 116810X (5 March 2021). – URL: <https://doi.org/10.1117/12.2584689>.
 14. Fafard, S.; York, M.C.A.; Proulx, F.; Wilkins, M.; Valdivia, C.E.; Bajcsy, M.; Ban, D.; Arès, R.; Aimez, V.; Hinzer, K.; et al. Ultra-efficient N-junction photovoltaic cells with Voc > 14 V at high optical input powers. In *Proceedings of the IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference, Portland, OR, USA, 5–10 June 2016*; p. 2374. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7750065>.
 15. Fafard, S.; Masson, D.P. US 20150162478A1-Transducer to Convert Optical Energy to Electrical Energy. U.S. Patent, Jun. 11, 2015. – URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/d1/11/5d/9773cd63b60f70/US20150162478A1.pdf>.
 16. Yamagata, Y.; Yamada, Y.; Kaifuchi, Y.; Nogawa, R.; Morohashi, R.; Yamaguchi, M. Performance and reliability of high power, high brightness 8xx-9xx nm semiconductor laser diodes. In *Proceedings of the 2015 IEEE High Power Diode Lasers and Systems Conference (HPD), Coventry, UK, 14–15 October 2015*; pp. 7–8. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7439668>.
 17. Haid, Matthias & Armbruster, Cornelius & Derix, David & Schöner, Christian & Helmers, Henning. (2019). 5 W Optical Power Link with Generic Voltage Output and Modulated Data Signal. – URL: https://www.researchgate.net/publication/332671391_5_W_Optical_Power_Link_with_Generic_Voltage_Output_and_Modulated_Data_Signal.
 18. Kovtun, A.A. Mekhtiyev A.D., Yugay, V.V. Aimagambetova, R.Z. Alkina, A.D., Neshina E. G.

- Research of mechanical stress at tension of quartz optical fiber (QOF). *Metalurgija* 60 (2021) 1-2, pp. 571-574. – URL: <https://hrcak.srce.hr/246106>.
19. Mekhtiyev A.D., Soldatov A.I., Neshina Y.G., Alkina A.D., Madi P.Sh. The working roof rock massif displacement control system. *N E W S of the Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan*, Volume 5, Number 449 (2021), pp. 68-76. – URL: <https://doi.org/10.32014/2021.2518-170X.100>.
20. Spravochniki. [Elektronnyj resurs] / Rezhim dostupa: – URL: http://electronic.com.ua/spravochniki/Tranzistorq_otehestvennqe/Tranzistorq_otehestvennqe_bol%60woy_moschnosti_nizkohastotnqe_KT_800-819.html (accessed: 18/01/2023).
21. Yurchenko A.V., Mekhtiev A.D., Al'kina A.D. Puti povysheniya effektivnosti solnechnyh elektrostancij. *Monografiya / Karagandinskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet*. – Karaganda: Izd-vo KarGTU, 2017. – 181 s.
-
-