

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **040836**(13) **B1**(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ**

(45) Дата публикации и выдачи патента
2022.08.02

(21) Номер заявки
202100241

(22) Дата подачи заявки
2021.10.12

(51) Int. Cl. **H01L 21/66** (2006.01)
G01R 31/265 (2006.01)
G01R 31/307 (2006.01)
G01R 31/311 (2006.01)

(54) СПОСОБ ИСПЫТАНИЙ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ТЯЖЕЛЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА НА ОСНОВЕ ИСТОЧНИКА СФОКУСИРОВАННОГО ИМПУЛЬСНОГО ЖЕСТКОГО ФОТОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЭФФЕКТЕ ОБРАТНОГО КОМПТОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ

(31) **RU2020137499**

(32) **2020.11.16**

(33) **RU**

(43) **2022.05.31**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:
**АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
"НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ ПРИБОРОВ" (RU)**

(72) Изобретатель:
**Емельянов Владимир Владимирович,
Озеров Александр Иванович, Ватуев
Александр Сергеевич, Усеинов
Рустэм Галеевич, Алексеев Иван
Александрович (RU)**

(56) **CARDOZA DAVID et al.: Comparison of Single Event Transients Generated by Short Pulsed X-Rays, Lasers and Heavy Ions, IEEE Trans. Nucl. Sci., 2014, vol. 61, No. 6, pp. 3154-3162**
GRAVES W. S. et al.: Compact X-Ray Source Based on Burst-Mode Inverse Compton Scattering at 100 kHz, Phys. Rev. ST Accel. Beams, 2014, 17, 120701(24)
RU-C2-2495446
RU-U1-110488
RU-C1-2578053
US-A-4786865

(57) Способ испытаний изделий электронной техники на стойкость к воздействию тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) космического пространства включает узконаправленный источник импульсного жесткого фотонного излучения на эффекте обратного комптоновского рассеяния, содержащий электронную пушку 1 с линейным ускорителем электронов 2 и системой фокусировки электронного пучка 3, лазерную систему 7 и точку столкновения электронов и фотонов 4, где генерируется излучение с энергией фотонов 8-12 кэВ, длительностью импульса не более 5 пс и энергией фотонов в импульсе до 500 пДж с системой фокусировки излучения на основе рентгеновской оптики 9 для получения оптического фокуса размером 5-10 мкм на испытуемом объекте в виде интегральной микросхемы, размещенной в держателе, который обеспечивает механическое перемещение исследуемого образца 6 в 3-х направлениях для последовательного точечного сканирования всей поверхности полупроводникового кристалла интегральной микросхемы (ИМС) или дискретного полупроводникового прибора (ДПП). Характеристики источника импульсного сфокусированного жесткого фотонного излучения на эффекте обратного комптоновского рассеяния с системой фокусировки достаточны для моделирования одиночных радиационных эффектов, возникающих при воздействии ТЗЧ, в полупроводниковых кристаллах ИМС и ДПП в широком диапазоне линейных передач энергии (ЛПЭ), и позволяют исключить недостатки, присущие методам испытаний с использованием сфокусированного импульсного лазерного излучения, и отказаться от использования дорогостоящих ускорителей ионов и источников синхротронного излучения.

B1**040836****040836 B1**

Изобретение относится к испытательному оборудованию, в частности к устройствам для проведения испытаний изделий электронной техники (ИЭТ) на стойкость к воздействию ионизирующих излучений космического пространства. Возникающие одиночные радиационные эффекты (ОРЭ) в ИЭТ при воздействии ТЗЧ околоземного космического пространства могут приводить к функциональным или кратковременным сбоям, а в ряде случаев и катастрофическим отказам, в работе отдельных узлов или всего космического аппарата.

Наиболее достоверное моделирование воздействия ТЗЧ на ИЭТ в наземных условиях достигается на многоцелевых ускорителях ионов с энергией более 3 МэВ/а.е.м. Проведение испытаний ИЭТ на многоцелевых ускорителях ионов является трудоемким, приводит к большим затратам ускорительного времени и, как следствие, к высокой стоимости испытаний при недостатке доступного ускорительного времени. К тому же, в силу статистического характера взаимодействия излучения с веществом, данные методы не позволяют определить локализацию места сбоя с привязкой к топологии полупроводникового кристалла ИМС и ДПП и являются таким образом не эффективными при сравнении различных схемотехнических методов обеспечения радиационной стойкости ИМС.

Параллельно с технологией проведения испытаний ИЭТ на ускорителях ионов успешно развиваются методы моделирования одиночных событий на основе сфокусированного импульсного лазерного излучения пикосекундной длительности с энергией фотонов в видимом и инфракрасном диапазонах. Многочисленные исследования ОРЭ, проведенные для кремниевых и $A_{III}-B_V$ приборов, биполярных и КМОП технологий, ЗУ, логики, линейных приборов и др., проведенные с помощью импульсного сфокусированного лазерного излучения доказали возможности такого моделирования, включая ограничения по его применению. Данные методы не моделируют ОРЭ в широкозонных материалах и их применение затруднено эффектами отражения излучения от слоев металлизации ИМС и ДПП /1/.

В последнее время появились данные о результатах успешного моделирования воздействия ТЗЧ на ИМС и ДПП с помощью импульсного сфокусированного синхротронного излучения (станция на канале 20-ID-B APS at Argonne National Laboratory) /2/. Синхротронное (рентгеновское) излучение позволяет избежать многих недостатков, присущих методам моделирования на основе сфокусированного импульсного лазерного излучения, но остаются недостатки, связанные с использованием многоцелевых ускорителей ионов (источники синхротронного излучения, так же, как и ускорители ионов, не относятся к доступным лабораторным установкам).

Настоящее изобретение направлено на достижение технического результата, заключающегося в устранении недостатков, присущих лазерным методам моделирования воздействия ТЗЧ космического пространства в изделиях электронной техники за счет использования сфокусированного импульсного жесткого фотонного (рентгеновского) излучения и снижения стоимости проведения экспериментов за счет отказа от использования дорогостоящих и дефицитных ускорителей ионов и синхротронных источников (или существенно снизить объем работ на них) и перенести эти испытания из лабораторий крупных ядерных центров в лаборатории фабрик по производству ИМС и ДПП или конструкторские организации по проектированию радиоэлектронной аппаратуры.

Технический результат достигается за счет использования компактного источника импульсного сфокусированного жесткого фотонного излучения на эффекте обратного комптоновского рассеяния, обладающего узкой направленностью, узким спектральным диапазоном, светимостью излучения, энергией фотонов в импульсе и возможностью достижения требуемого оптического фокуса на мишени достаточными для моделирования треков ТЗЧ в кристаллических структурах ИМС и ДПП в широком диапазоне ЛПЭ.

Известна установка с источником рентгеновского излучения на эффекте обратного комптоновского рассеяния для исследования структуры материалов и визуализации образцов путем измерения рассеяния рентгеновского излучения на исследуемом образце (патент на изобретение WO 2015/1677535), где дается описание проекта (концепции и варианты) для критически размерного малоуглового рентгеновского рассеяния (CD-SAXS), генерируемого при столкновении импульсов ускоренных релятивистских электронов с лазерными импульсами (запертыми в оптическом резонаторе), на эффекте обратного комптоновского рассеяния. Источник генерирует последовательность, состоящую из 100 рентгеновских импульсов с длительностью 0,5 пс и частотой такой последовательности 1 кГц. Совмещенная рентгеновская оптика (Монтеля или Киркпатрика-Баеза) позволяет собирать и коллимировать большое количество рентгеновского излучения при угловой расходимости рентгеновского излучения до 10 мрад в энергетической полосе 5%.

Расчетные значения эффективности такого источника рентгеновского излучения при полосе пропускания 0,1 и 5% для энергии рентгеновских фотонов 12,4 кэВ представлены в таблице.

Параметр, размерность	0,1% полоса пропускания	5% полоса пропускания
Энергия рентгеновских фотонов, кэВ	12,4	12,4
Средний поток излучения, фотон/сек,	2×10^{10}	5×10^{11}
Средняя яркость, фотон/(сек мм ² мрад ²)	7×10^{12}	2×10^{12}
Максимальная яркость, фотон/(сек мм ² мрад ²)	3×10^{19}	9×10^{18}
Угол раскрытия, мрад	3,3	4,3

Недостатком этого источника является то, что он разработан для получения максимальной средней яркости, необходимой при рентгенографическом исследовании. Несмотря на то, что энергия фотонов и размер источника рентгеновского излучения достаточны при моделировании ТЗЧ, другие параметры, такие как энергия фотонов в импульсе, длительность импульса, их частота и размер оптического фокуса требуют оптимизации применительно к моделированию воздействия ТЗЧ.

Известна установка (Патент на полезную модель RU 110488 U1) с лазерным имитатором для исследования радиационной стойкости интегральных схем к воздействию отдельных заряженных частиц, состоящая из лазерного источника для излучения ультракоротких лазерных импульсов пикосекундой (70 пс) длительности в направлении фокусирующего устройства и передачи его через это устройство на испытуемый объект в виде образца интегральной схемы; привод перемещения предметного столика выполнен в виде трех прецизионных шаговых двигателей для перемещения в 3-х направлениях, а в качестве лазерного источника использован твердотельный пикосекундный лазер с диодной накачкой со встроенным преобразователем во вторую гармонику, работающий на двух переключаемых длинах на частоте повторения импульсов до 1000 Гц, при этом указанный лазер выполнен с функцией выделения одиночного импульса из цуга пикосекундных импульсов. Пикосекундный лазер генерирует импульсы излучения длительностью 30 пс на двух переключаемых длинах волн с энергией (в области облучения объекта) соответственно 15 мкДж ($\lambda_1=1064$ нм) и 8 мкДж ($\lambda_2=532$ нм). Применение методов тестирования ИМС пикосекундными лазерными импульсами позволяет, сканируя поверхность полупроводникового кристалла ИМС, прецизионно локализовать чувствительные к описанным эффектам области и найти пороги их возникновения.

Основными недостатками лазерного способа моделирования воздействия ТЗЧ являются потери лазерного излучения за счет отражения от слоев металлизации, поглощения в вышележащих слоях высоколегированных полупроводниковых областей, что в конечном итоге приводит к неопределенности конкретной величины диаметра пятна и расчетных оценках величины энергии сфокусированного лазерного излучения внутри чувствительной области. Кроме того, влияние оптических неоднородностей на поверхности полупроводникового кристалла ИМС и ДПП также приводит к потерям лазерного излучения и требует проведения большого комплекса дополнительных калибровочных испытаний с применением дорогостоящих ускорителей ионов. Лазерное излучение не позволяет моделировать все типы возникающих ОРЭ, в частности эффекты, связанные с ионизацией диэлектрических структур.

В основе метода моделирования воздействия ТЗЧ на ИМС или ДПП с помощью импульсного сфокусированного фотонного излучения лежит гипотеза о том, что в обоих случаях реакция исследуемого прибора будет одинакова, если в чувствительной области прибора созданы равные количества неравновесных электронно-дырочных пар на единицу длины вдоль направления движения частицы и сфокусированного пучка фотонов. Чувствительной областью в данном случае является область формирования р-п переходов на верхней поверхности полупроводникового кристалла сразу под слоями диэлектрической изоляции и слоями металлических проводников. Типичная толщина чувствительной области составляет от нескольких долей до нескольких единиц микрометров полупроводникового материала, как правило, кремния. В первом приближении количество неравновесных электронно-дырочных пар на единицу длины $\frac{\partial N_{e-p}}{\partial z}$ рассчитывается следующим образом:

для ТЗЧ

$$\frac{\partial N_{e-p}}{\partial z} = LET \times \rho / E_{e-ph};$$

для импульсного жесткого фотонного излучения

$$\frac{\partial N_{e-p}}{\partial z} = \alpha \times \exp(-\alpha z) \times \frac{E_{имп}}{E_{e-ph}};$$

где LET - линейная передача энергии (ЛПЭ) ТЗЧ; ρ - плотность материала; E_{e-ph} - энергия, затраченная на создание одной электронно-дырочной пары при воздействии ТЗЧ и жесткого фотонного излучения; α - показатель поглощения фотонного излучения;

R - коэффициент отражения лазерного излучения от поверхности полупроводникового кристалла, $E_{имп}$ - энергия в импульсе фотонного излучения; $h\nu$ - энергия кванта лазерного излучения; z - дистанция от поверхности полупроводникового кристалла.

Основным параметром, характеризующим чувствительность изделия электронной техники к воздействию ТЗЧ, является значение LET, при котором возникает (начинает проявляться) то или иное нарушение в работоспособности изделия. Данный параметр, называемый "пороговое значение LET", явля-

ется предметом определения или оценки в процессе экспериментов (испытаний). Приравнивая значения величин $\frac{\partial N_{e-p}}{\partial z}$ для ТЗЧ и жесткого фотонного излучения, можно получить соотношения между значениями линейной передачи энергии LET для ТЗЧ и $E_{\text{имп}}$:

$$LET = E_{\text{имп}} \times \exp(-\alpha z) \times \alpha / \rho. \quad (1)$$

Изложенная выше гипотеза является справедливой только в рамках определенных ограничений на параметры фотонного излучения. Очевидным требованием является то, что энергия кванта фотонного излучения должна быть больше ширины запрещенной зоны материала, из которого сделана чувствительная область исследуемого изделия. Существует также ряд ограничений на длительность импульса фотонного излучения и размер пятна излучения на поверхности полупроводникового кристалла. Для того, чтобы приведенные соотношения между LET и $E_{\text{имп}}$ выполнялись, точное воспроизведение временных и микроструктурных параметров ионизационного трека ТЗЧ в чувствительной области не требуется, однако параметры области создаваемых неравновесных электронно-дырочных пар при воздействии ТЗЧ и импульсного фотонного излучения должны быть близки. В ходе многочисленных исследований (см., например, [1]) было показано, что пороговая энергия импульсного лазерного излучения не зависит от длительности импульса в диапазоне значений менее 10^{-11} с, а также не зависит от размера пятна излучения в диапазоне значений менее 5 мкм в диаметре. Указанные параметры качественно соответствуют значению времени термализации радиационно-индуцированных носителей заряда в кремнии и значению эффективного размера области неравновесных электронно-дырочных пар, возникающей при воздействии ТЗЧ к моменту термализации. Поэтому данные значения можно считать оптимальными и универсальными, по крайней мере, для кремниевой электроники, и их следует использовать для задания требуемых характеристик источника сфокусированного жесткого фотонного излучения. Выбор энергии квантов жесткого фотонного излучения в диапазоне 8-12 кэВ определяется компромиссом между требуемым значением расстояния (z_0), на котором поток монохроматического излучения уменьшается в результате поглощения в среде в e раз (величина обратная показателю поглощения), и возможностями рентгеновской оптики для фокусировки пучка фотонов. С одной стороны, величина z_0 должна существенно превышать характерную глубину чувствительной области (несколько микрометров), что обусловлено необходимой минимизацией погрешностей, вносимых экспоненциальным членом в соотношении между LET и $E_{\text{имп}}$. Это накладывает ограничения по энергии квантов снизу. Для энергии 8 кэВ величина z_0 составляет 69.6 мкм, а для энергии 12 кэВ - 229 мкм. С другой стороны, коэффициенты пропускания как поликапиллярной, так и зеркальной оптики с увеличением энергии кванта более 12 кэВ резко уменьшаются, что не позволяет создать установку с требуемыми характеристиками по $E_{\text{имп}}$.

Как было показано в работе [12] основные изменения спектра "отдельных" заряженных частиц галактических космических лучей приходятся на значения $LET < 100$. В первом приближении по формуле (1), при $\exp(-\alpha z) \approx 1$, для энергии рентгеновского кванта 10 кэВ при коэффициенте поглощения фотона в кремнии 134 мкм и плотности кремния 2,3 г/см³ получим, что при $LET=100$ энергия рентгеновского импульса должна составлять ~ 480 пДж.

Исходя из вышеизложенного, следует, что оптимальными параметрами на мишени для источника сфокусированного жесткого фотонного излучения при моделировании воздействия ТЗЧ должны быть энергия фотонов 8-42 кэВ, энергия фотонов в импульсе до 500 пДж, длительность импульса фотонного излучения не более 5 пс и размер оптического фокуса на мишени не более 10 мкм.

Как показал анализ существующих источников жесткого фотонного (рентгеновского) излучения наиболее удовлетворяющим перечисленным выше требованиям для моделирования ТЗЧ в изделиях электронной техники являются компактные источники жесткого фотонного излучения на эффекте обратного комптоновского рассеяния [3,4], которые разрабатываются в основном применительно для рентгенографической визуализации быстротекущих процессов в органических структурах и диагностической фазово-контрастной визуализации при медицинских исследованиях, а также для областей макромолекулярной кристаллографии и порошковой дифракции и измерения критических параметров полупроводниковых материалов. Яркость излучения таких источников занимает промежуточное положение между традиционными рентгеновскими трубками и источниками синхротронного излучения (3-го поколения) на больших ускорителях электронов. Такие источники излучения также могут найти применение в ускорении темпов открытия лекарств, предоставляя белковые структурные решения сразу после кристаллизации, а не ждать драгоценные дни, недели, а иногда и месяцы для доступа к большим, удаленным синхротронам.

Применительно к моделированию воздействия ТЗЧ основные преимущества такого источника излучения включают: узкую направленность излучения (в телесном угле $\sim 1/\gamma$ сосредоточено около 79% жесткого фотонного излучения при энергии электронов 24 МэВ), что позволяет минимизировать потери энергии излучения; узкий спектральный диапазон энергий фотонов; светимость и энергия в импульсе достаточны для моделирования ОРЭ, возникающих при воздействии ТЗЧ в кристаллических структурах ИМС и ДПП в широком диапазоне ЛПЭ. При этом стоимость создания таких установок на порядок меньше, чем источников синхротронного излучения.

Общий вид установки с источником сфокусированного импульсного жесткого фотонного излуче-

ния на эффекте обратного комптоновского рассеяния для проведения испытаний изделий электронной техники к воздействию отдельных заряженных частиц приведен на фиг. 1

Источник электронов представляет собой электронную пушку 1 с фотокатодом, например, на основе меди, на котором формируется электронный импульс/сгусток электронов, который разгоняется в линейном ускорителе 2 до энергий электронов порядка 23-25 МэВ. Заряд электронов в сгустке/импульсе составляет не менее 100 пКл, а его длительность не более 5 пс. Частота следования импульсов электронов составляет не более 1 кГц. После линейного ускорения сгусток/импульс электронов проходит систему фокусировки 3 на основе квадрупольных магнитов, которая создает дисперсию электронного пучка не более 30 мкм и направляет его в камеру столкновения с лазерным импульсом.

В качестве источника пикосекундных лазерных импульсов, например, могут использоваться лазерные системы 7 с твердотельным лазером на основе алюмо-иттриевых гранатов ("YAG", $Y_3Al_5O_{12}$), легированных ионами иттербия (Yb^{3+}) с длиной волны 1028 нм или ионами неодима (Nd^{3+}) с длиной волны 1064 нм, длительностью импульса до 5 пс и частотой повторения импульсов не более 1 кГц. Лазерное излучение по вакуумированной системе транспортировки проходит через систему фокусировки с тем, чтобы в точке столкновения 4 с электронным сгустком размер перетяжки/фокуса лазерного импульса был не более 10 мкм.

В вакуумной камере релятивистский сгусток/импульс электронов взаимодействует с лазерным импульсом в точке столкновения 4, в результате чего энергия электронов передается лазерным фотонам и, таким образом, генерируется узконаправленное импульсное рентгеновское излучение с энергией фотонов 8-12 кэВ и энергией фотонов в импульсе до 5 нДж. Так как направление рентгеновского излучения совпадает с направлением электронов, то после камеры столкновения электроны отклоняются дипольным магнитом 8 от первоначальной траектории и утилизируются в электронной ловушке 5.

Рентгеновская фокусирующая оптика 9 выполняется, например, на основе зеркал Киркпатрика-Баеза с эффективностью не менее 10%, что обеспечивает на мишени энергию импульса фотонов до 500 пДж, фокусное расстояние от последнего элемента оптики до мишени составляет не менее 100 мм и размер фокуса на мишени не более 10 мкм.

Держатель образца ИМС обеспечивает механическое перемещение исследуемого образца 6 в 3-х направлениях для последовательного точечного сканирования всей поверхности с расстояниями между точками соизмеримым с размерами ионизационных треков ТЗЧ.

При столкновении пикосекундных импульсов ускоренных (релятивистских) электронов с такими же по длительности лазерными импульсами в точке столкновения формируется анизотропное (узконаправленное) импульсное жесткое фотонное излучение пикосекундной длительности с энергией в импульсе достаточной, чтобы после прохождения системы фокусировки сформировать на мишени в оптическом фокусе размером до 10 мкм импульс с энергией до 500 пДж и длительностью не более 5 пс. Такой импульс, попадая на поверхность полупроводникового кристалла ИМС или ДПП, формирует область повышенной концентрации носителей заряда, моделируя воздействие ТЗЧ КП практически по все области ЛПЭ. Держатель ИМС обеспечивает механическое перемещение исследуемого образца в 3-х направлениях для последовательного точечного сканирования всей поверхности с расстояниями между точками соизмеримым с размерами ионизационных треков ТЗЧ для выявления наиболее чувствительных областей к ОРЭ.

Литература

1. Pulsed-Laser Testing for Single-Event Effects Investigations / S. Buchner, F. Miller, V. Pouget, D. Mcmorrow // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2013. Vol. 60, № 3.
2. Cardoza D., Lalumondiere S., Tockstein M., Brewе D., Wells N., Koga R., Kevin M. Gaab, William T. Lotshaw, Moss S.C. Comparison of Single Event Transients Generated by Short Pulsed X-Rays, Lasers and Heavy Ions, TNS-2014, p. 3164
3. The Near-Earth Space Radiation Environment Sébastien / M. Xapsos, P. O'Neill, T. P. O'Brien // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2008. Vol. 55, № 4.
4. Compact x-ray source based on burst-mode inverse Compton scattering at 100 kHz / Graves W. S., Bessuille J., Brown P., Carbajo S., Dolgashev V., Hong K.-H., Ihloff E., Khaykovich B., Lin H., Murari K., Nanni E. A., Resta G., Tantawi S., Zapata L. E., Kärtner F. X. and Moncton D. E. // Phys. Rev. ST Accel. Beams 17(12), 120701 (2014)
5. Hornberger B., J. Kasahara, M. Gifford, R. Ruth, R. Loewen A compact light source providing high-flux, quasi-monochromatic, tunable X-rays in the laboratory // SPIE 11110, Advances in Laboratorybased X-Ray Sources, Optics, and Applications VII, 1111003: proceedings. San Diego, California, USA, 2019, September 9. doi: 10.1117/12.2527356

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

Способ для исследования радиационной стойкости изделий электронной техники (ИЭТ) к воздействию тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ), включающий последовательное точечное сканирование полупроводникового кристалла интегральной микросхемы (ИМС) или дискретного полупроводникового прибора (ДПП) импульсным жестким фотонным излучением с длительностью импульсов до 5 пс, энергией электронов 8-12 кэВ и энергией фотонов в импульсе до 500 пДж, что в пересчете в эквивалентные значения линейных передач энергии (ЛПЭ) моделирует воздействие ТЗЧ практически всего спектра галактических космических лучей и позволяет устранить большинство критических недостатков, присущих методам моделирования с использованием ускорителей ионов, лазерных и синхротронных источников, выявление наиболее чувствительных к одиночным радиационным эффектам (ОРЭ) областей, отличающийся тем, что в качестве источника импульсного фотонного излучения используется компактный источник остросфокусированного жесткого фотонного излучения пикосекундной длительности на эффекте обратного комптоновского рассеяния, содержащий электронную пушку (1) с импульсным ускорителем электронов (2), источник импульсного лазерного излучения (7), камеру столкновения электронных и лазерных импульсов (4), фокусирующую рентгеновскую оптику (9) для создания оптического фокуса размером до 10 мкм в плоскости приборного слоя полупроводникового кристалла ИМС или ДПП (6).

