

06;07;12

Быстродействующий пленочный фотоприемник мощного лазерного излучения на эффекте оптического выпрямления

© Г.М. Михеев,^{1,*} Р.Г. Зонов,¹ А.Н. Образцов,² А.П. Волков,² Ю.П. Свирко³¹Институт прикладной механики УрО РАН,
426067 Ижевск, Россия²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119992 Москва, Россия³Физический факультет университета Йоенсуу,
FIN 80101 Йоенсуу, Финляндия

*e-mail: gmmikheev@udmnet.ru

(Поступило в Редакцию 11 июля 2005 г. В окончательной редакции 12 января 2006 г.)

Представлены результаты экспериментальных исследований эффективности преобразования мощного импульсного лазерного излучения в электрический сигнал за счет эффекта оптического выпрямления в нанографитных пленках. Обнаружено, что амплитуда сигнала существенно зависит от размеров пленки, а также длины и взаимного расположения электродов, используемых для его измерения. Показано, что максимальная чувствительность фотоприемника (ФП), состоящего из пленки с электродами и работающего без внешнего источника питания и дополнительных навесных элементов, достигается при размерах пленки, сравнимых с диаметром пучка лазера и составляет более 500 mV/MW на длине волны 1064 nm. Исследована чувствительность такого фотоприемника при перемещении пучка наносекундного импульсного лазера по поверхности пленки в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Обнаружено возрастание локальной чувствительности вблизи свободных краев ФП. Показано, что ФП из нанографитной пленки и аналогичный ФП из полированной кремниевой пластины имеют принципиально различные характеристики.

PACS: 85.60.Gz

Введение

В лазерной технике часто приходится сталкиваться с необходимостью контролировать форму мощных лазерных импульсов наносекундной и субнаносекундной длительностей. Обычно для этих целей используются хорошо известные вакуумные фотоэлементы [1], а также полупроводниковые $p-i-n$ и лавинные фотодиоды [2], основанные на внешнем и внутреннем фотоэффектах соответственно. Наряду с этим в быстродействующих приемниках излучения, предназначенных для измерения мощности и формы импульсов излучения лазеров также используется эффект фотонного увлечения (светового давления), имеющий инерционность около 10^{-10} s [3–5]. В приборах этого типа электрический сигнал возникает в результате появления незначительной по величине фотоэдс, которая возникает благодаря импульсу–отдаче при поглощении фотонов носителями заряда.

Для измерения параметров импульсного лазерного излучения также используются приборы, основанные на эффекте оптического выпрямления (ЭОВ) [6,7]. Временное разрешение датчиков на основе ЭОВ превосходит возможности всех имеющихся в настоящее время фотоприемников. Однако коэффициент преобразования (чувствительность) η мощности P лазерного импульса в напряжение U оптического выпрямления для большинства используемых для этих целей нецентросимметричных кристаллов (таких, как KDP, DKDP, RDP и др.) невелико и составляет 10–20 mV/MW. Кроме того,

сопутствующие ЭОВ „паразитные“ эффекты (пьезоэлектрический, пироэлектрический и др.) могут отрицательным образом сказаться на процессе определения формы лазерных импульсов на основе нелинейно-оптических кристаллов. В недавних работах [8–10] нами сообщалось о наблюдении гигантского ЭОВ на квадрупольном вкладе квадратичной по полю статической поляризации нелинейной среды в нанографитной пленке, где перечисленные „паразитные“ эффекты отсутствуют. Изучался коэффициент преобразования ЭОВ от угла падения, поляризации излучения, мощности и ее плотности [8–10], длины волны лазерного излучения [11], а также от толщины нанографических пленок [12]. Было показано, что нанографитные пленки могут использоваться для создания простых фотоприемников мощного лазерного излучения в широком спектральном диапазоне от 266 до 5000 nm с быстродействием лучше, чем 0.5 ns [12,13]. Для разработки оптимальной конструкции ФП представляет интерес исследование коэффициента преобразования η в зависимости от геометрических размеров пленки и расположенных на ней электродов, что является целью данной работы.

Особенности конструкции ФП

Главными элементами рассматриваемого ФП являются нанографитная пленка 1 (рис. 1, *a*) на кремниевой подложке 2 (рис. 1, *b*) прямоугольной формы размерами $l \times h$ и два электрода, выполненные в виде плоских

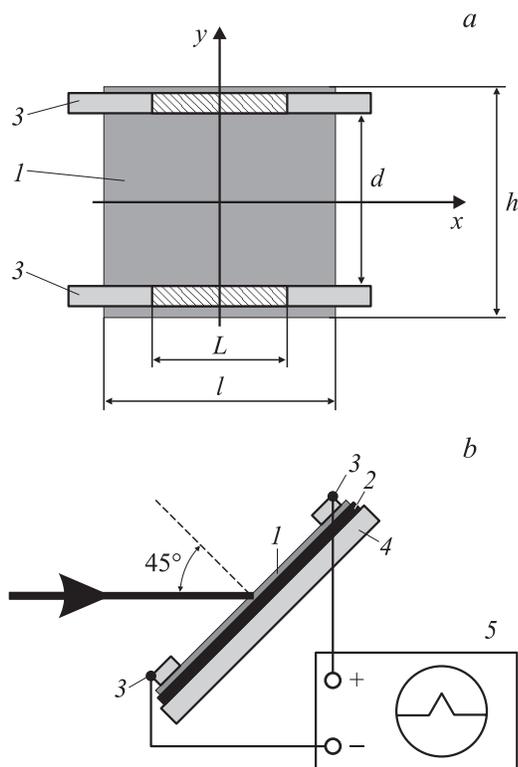


Рис. 1. Конструкции ФП из нанографитной пленки (а) и схема эксперимента (б): x , y — оси прямоугольной системы координат, совпадающие с осями симметрии пленки.

диэлектрических пластин 3, имеющих четырехстороннее проводящее покрытие длиной L , сигнал с которых подается на осциллограф 5. С помощью пластин 3 пленка 1 прижимается к диэлектрическому держателю 4, причем пластины располагаются на поверхности пленки параллельно друг другу вдоль противоположных сторон пленки на расстоянии d друг от друга. С помощью двух гибких медных проводников напряжение, возникающее между электродами (проводящими частями пластин), подается на коаксиальный разъем, закрепленный на корпусе ФП с тыльной стороны диэлектрического держателя в непосредственной близости от нанографитной пленки. Сопротивление постоянному току между электродами составляет 20–200 Ω в зависимости от расстояния между ними и размеров пленок. Емкость между электродами во всех случаях, рассмотренных в данной работе, менее 1 pF. Таким образом, в устройстве ФП отсутствуют навесные элементы из резисторов, конденсаторов и прочих радиоэлементов. Необходимо особо отметить, что такой ФП работает без внешнего источника электропитания. Также был изготовлен ФП по вышеописанной схеме, где в качестве фоточувствительной части вместо нанографитной пленки использовалась полированная кремниевая пластина, электроды на пластинах наносились методом вакуумного термического напыления меди.

Нанографитная пленка была получена на кремниевой подложке с помощью плазмохимического осаждения из смеси метана и водорода на установке [14] по стандартной методике, описанной в работах [15,16]. Основными структурными элементами пленок являются кристаллы неправильной формы, состоящие из нескольких (от 5 до 50) параллельных хорошо упорядоченных атомных слоев графита. Толщина кристаллитов находится в пределах 2–20 nm при размерах в других измерениях около 1–3 μm . Все кристаллиты имеют преимущественную ориентацию атомных слоев в направлении нормали к поверхности подложки с максимальным отклонением не более $\pm 20^\circ$. Расстояние между отдельными кристаллитами составляет около 0.5–1 μm . Таким образом, используемые пленки имеют ярко выраженную мезопористую нанокристаллическую структуру. Средняя толщина этих наноуглеродных пленок составляет около 3–4 μm .

Техника эксперимента

Эксперименты проводились с помощью одноимодового YAG:Nd³⁺-лазера с пассивной модуляцией добротности [17], длительностью импульсов 20 ns и диаметром пучка 2 mm. Энергия импульса лазера была ниже порога разрушения материала пленки и составляла 1–3 mJ. Наблюдение формы импульсного электрического напряжения, возникающего между электродами при лазерном облучении ФП, осуществлялось с помощью осциллографа с полосой пропускания 250 MHz и входным сопротивлением 50 Ω , а измерение амплитуды — с помощью запоминающего осциллографа с полосой пропускания 50 MHz и входным сопротивлением 1 M Ω . Форма импульсов наблюдалась на экране осциллографа и фотографировалась с помощью цифровой фотокамеры.

Ранее в [8–10] было показано, что максимальный сигнал ЭОВ достигается для p -поляризованного излучения при ориентации плоскости нанографитной пленки перпендикулярно плоскости падения и углах падения около 45° . Поэтому во всех экспериментах в данной работе для определенности плоскость ФП располагалась под углом 45° к падающему пучку лазера. При этом плоскость падения была перпендикулярна к параллельно расположенным электродам (рис. 1, б). При исследовании зависимости чувствительности ФП от длины электродов использовались одинаково изготовленные диэлектрические пластины с различной длиной L четырехстороннего проводящего покрытия. Последние располагались симметрично относительно осей симметрии пластины (рис. 1, а), а пучок лазера направлялся в центр пластины. Для исследования чувствительности ФП в зависимости от положения пучка на пленке, т. е. от соответствующих координат x и y (рис. 1, а), использовался ФП из нанографитной пленки квадратной формы (25 \times 25 mm) с тонкими медными электродами, нанесенными на пленку в вакууме методом термического испарения. Для измерения положения пучка на поверхности пленки ис-

пользовался двухкоординатный стол. При определении локальной чувствительности на свободных краях ФП учитывалась только та часть импульсной энергии, которая действительно попадала на нанографитную пленку.

Результаты экспериментов и их обсуждение

На рис. 2, *a* представлена типичная форма импульсного электрического напряжения, регистрируемого с помощью осциллографа при облучении нанографитного пленочного ФП импульсным лазерным излучением длительностью 20 ns. Из рисунка видно, что форма фотоэлектрического импульса, возникающего в нанографитной пленке за счет ЭОВ, практически совпадает с формой лазерного импульса (рис. 2, *b*), полученного с помощью лавинного фотодиода ЛФД-2 (за исключением того, что задний фронт импульса с лавинного фотодиода несколько растягивается из-за применения RC-цепочки). На рис. 2, *c* показана форма фотоэлектрического импульса, зарегистрированного с применением аналогичного ФП из пластины полированного кремния. Этот импульсный сигнал возникает за счет хорошо известного эффекта Дембера [12] и существенно отличается от лазерного

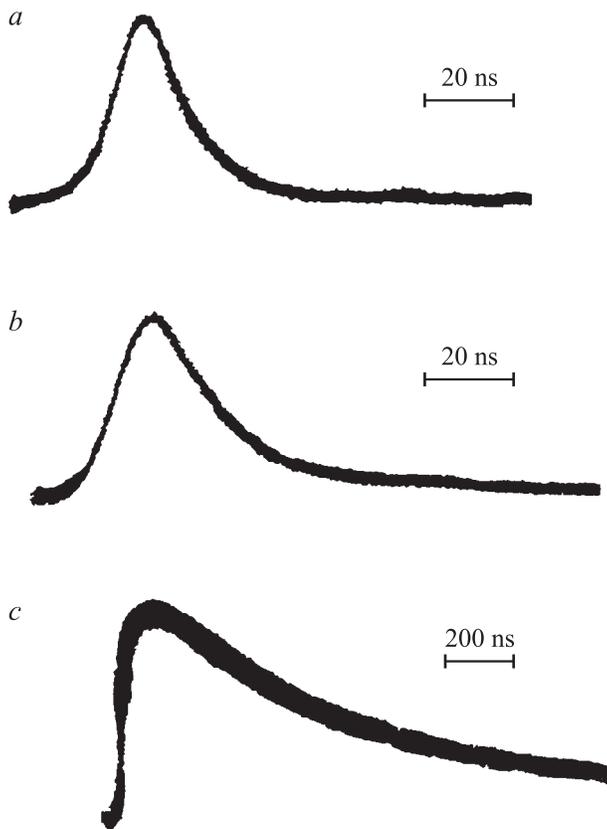


Рис. 2. Типичная форма фотоэлектрических импульсов на выходе ФП из нанографитной пленки (*a*) и кремниевой пластины (*c*), а также форма лазерного импульса, полученная с помощью лавинного фотодиода (*b*).

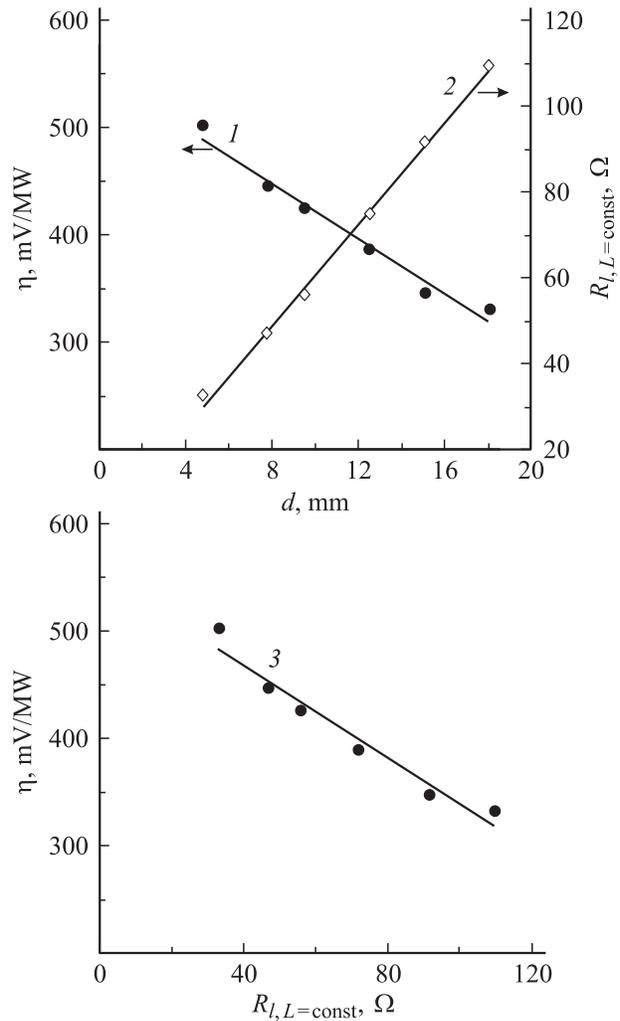


Рис. 3. Зависимости чувствительности фотоприемника η (1) и сопротивления между электродами $R_{l,L=\text{const}}$ (2) от межэлектродного расстояния d , а также зависимость η от $R_{l,L=\text{const}}$ (3).

импульса по форме и длительности: длительность по полувысоте составляет около $0.4 \mu\text{s}$ (рис. 2, *c*), что в 20 раз больше длительности сигнала ЭОВ.

На рис. 3 (1) представлена зависимость чувствительности фотоприемника η (при фиксированных значениях l и L , $l = L = 5.1 \text{ mm}$) от межэлектродного расстояния d . Видно, что увеличение d приводит к прямо пропорциональному уменьшению η . Необходимо отметить, что увеличение межэлектродного расстояния приводит к линейному увеличению сопротивления постоянному току $R_{l,L=\text{const}}$ между электродами, как это показано на экспериментальной зависимости, представленной на рис. 3 (2). Полученные результаты позволяют построить зависимость η от межэлектродного сопротивления $R_{l,L=\text{const}}$ (рис. 3, 3). Таким образом, увеличение межэлектродного сопротивления $R_{l,L=\text{const}}$ фотоприемника приводит к пропорциональному уменьшению чувствительности.

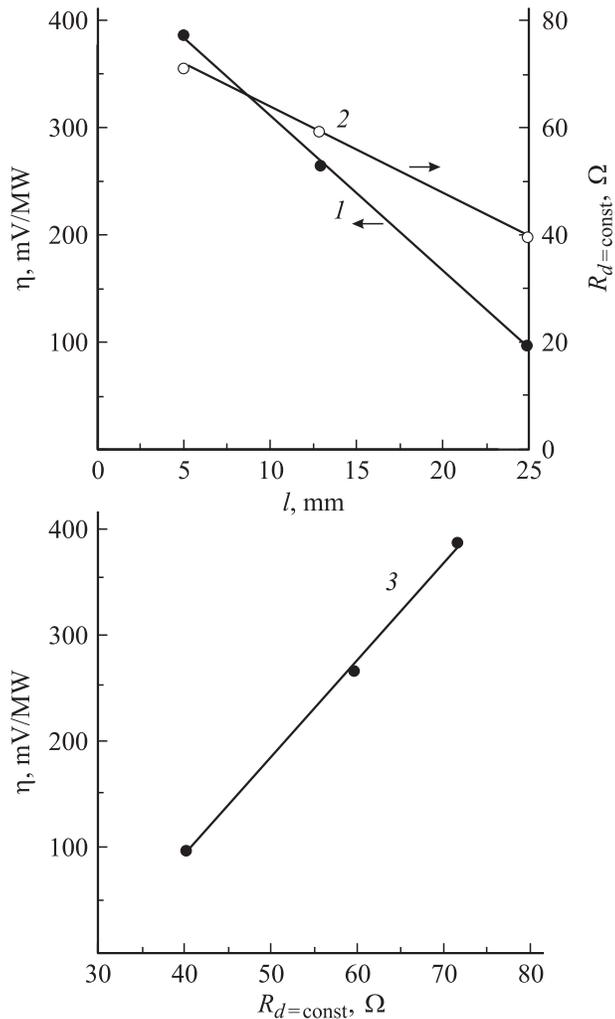


Рис. 4. Зависимости чувствительности фотоприемника η (1) и сопротивления между электродами $R_{d=\text{const}}$ (2) от ширины нанографитной пленки l , а также зависимость η от $R_{d=\text{const}}$ (3).

На рис. 4 представлены аналогичные зависимости от ширины пластины l ($L=l$), полученные при фиксированном значении межэлектродного расстояния $d=18.8$ mm. Уменьшение ширины пластины l вызывает возрастание чувствительности ФП (рис. 4, 1). Очевидно, что уменьшение ширины нанографитной пленки приводит к увеличению межэлектродного сопротивления $R_{d=\text{const}}$ (рис. 4, 2). Таким образом, при фиксированном межэлектродном расстоянии увеличение сопротивления между электродами $R_{d=\text{const}}$ за счет уменьшения ширины пленки приводит к пропорциональному увеличению чувствительности (рис. 4, 3).

Результаты исследований влияния длины электродов L (при фиксированных значениях l, d) на чувствительность приведены на рис. 5 (1). Видно, что зависимость $\eta(L)$ имеет максимальное значение в диапазоне $L \cong L_{\text{opt}}$, где $L_{\text{opt}}=6$ mm. При $L < L_{\text{opt}}$, а также $L > L_{\text{opt}}$ чувствительность значительно уменьшается. Экспериментальная зависимость $R_{l,d=\text{const}}(L)$ (рис. 5, 2), описывающая соответствующее изменение сопротивления между элект-

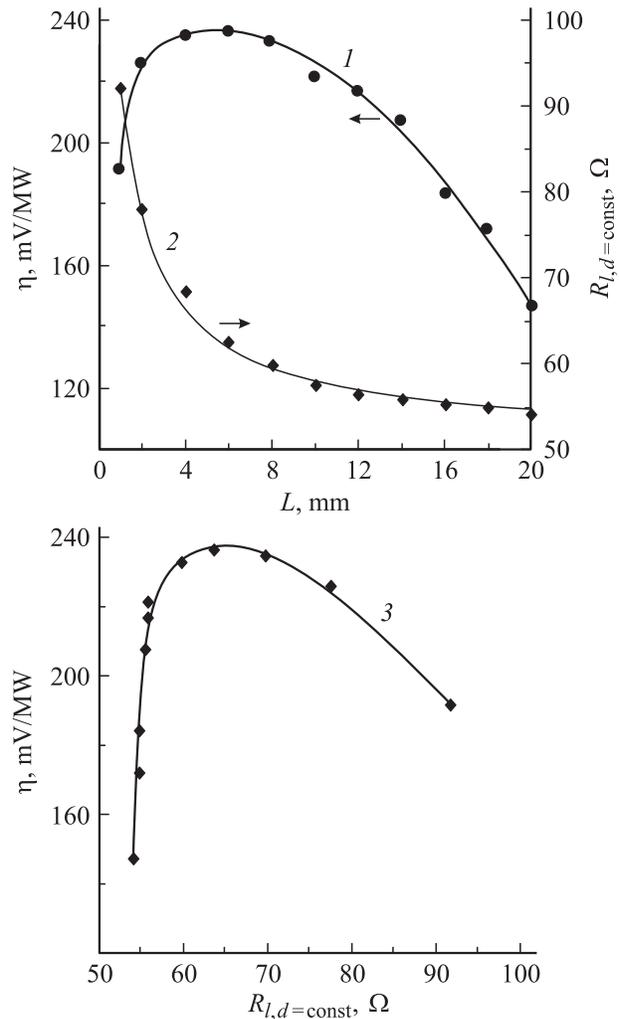


Рис. 5. Зависимости чувствительности η (1) и сопротивления $R_{l,d=\text{const}}$ (2) фотоприемника между электродами от длины электродов L , а также зависимость η от $R_{l,d=\text{const}}$ (3).

троды, с увеличением длины электродов является монотонно убывающей функцией, что очевидно. Полученные результаты позволяют построить зависимость $\eta(R_{l,d=\text{const}})$ (рис. 5, 3). Видно, что увеличение межэлектродного сопротивления $R_{l,d=\text{const}}$ за счет уменьшения длины электродов сначала приводит к возрастанию η , при некотором оптимальном значении $R_{l,d=\text{const}}$ коэффициент преобразования принимает максимальное значение, а дальнейшее увеличение межэлектродного сопротивления $R_{l,d=\text{const}}$ приводит к уменьшению η .

Экспериментальные результаты, представленные на рис. 3 (3), 4 (3) и 5 (3) показывают, что коэффициент преобразования η может возрастать или уменьшаться с уменьшением сопротивления между электродами. Видно, что это зависит от того, каким образом достигается это уменьшение: за счет уменьшения d либо увеличения l , либо же за счет изменения L . Однако зависимости, представленные на рис. 3 и 4 свидетельствуют о том, что с уменьшением приемной части нанографитной пленки как за счет уменьшения межэлектродного расстояния,

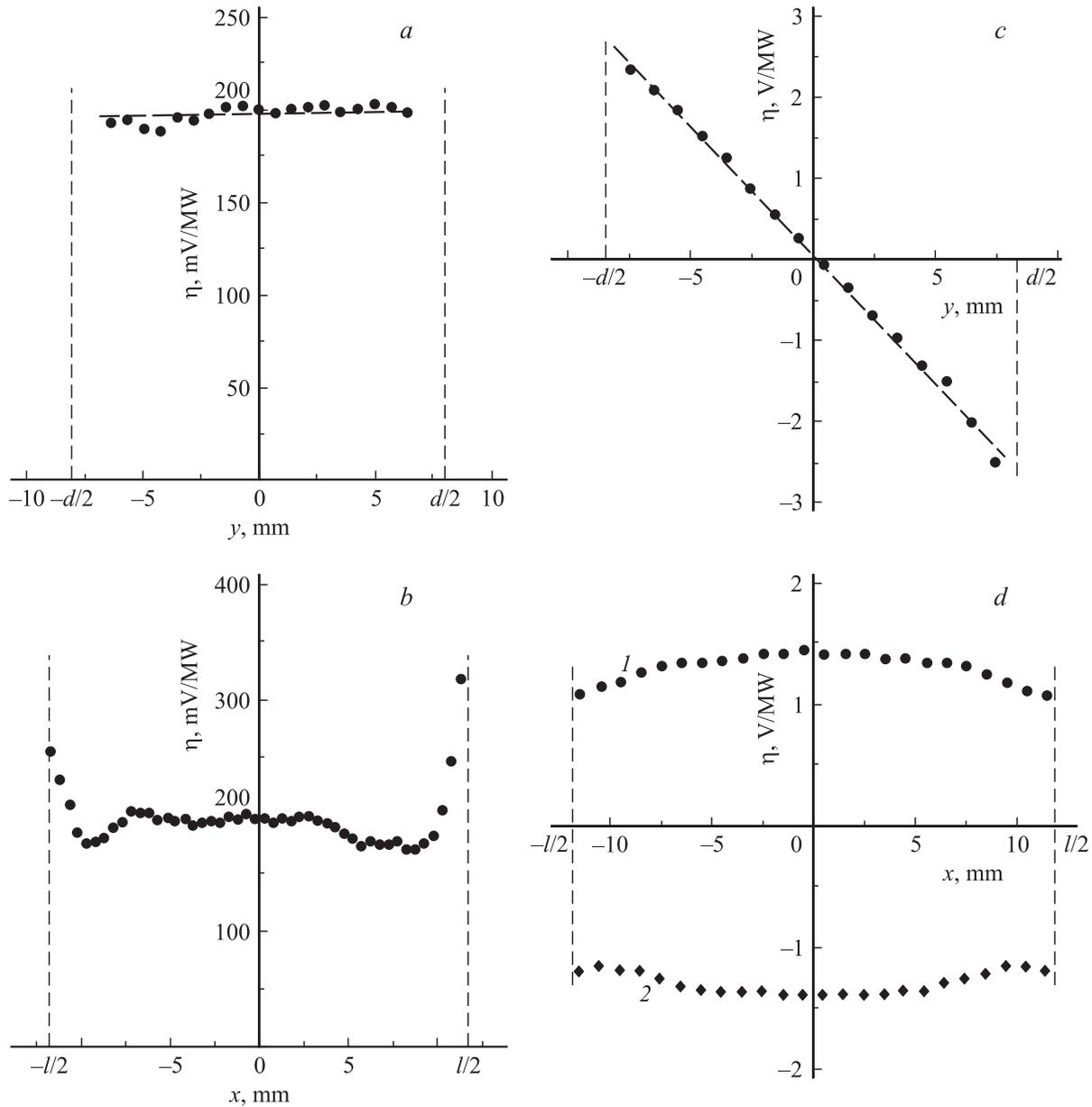


Рис. 6. Зависимости локальной чувствительности фотоприемника η из нанографитной пленки (*a, b*) и кремниевой подложки (*c, d*) при сканировании луча лазера.

так и за счет уменьшения расстояния между свободными краями, сигнал ЭОВ возрастает. Это позволяет сделать вывод о том, что для получения максимальной чувствительности необходимо уменьшать приемную часть ФП до размера лазерного пятна. При ширине нанографитной пленки $l = 5$ mm и расстояния между электродами $d = 5$ mm чувствительность ФП на длине волны 1064 nm составляет 510 mV/MW. Это во много раз выше соответствующей чувствительности ФП на ЭОВ, выполненных из нелинейно-оптических кристаллов.

Изменение локальной чувствительности нанографитного пленочного ФП при перемещении пучка лазера вдоль оси y , перпендикулярной электродам, при $x = 0$ (см. рис. 1, *a*) показано на рис. 6, *a*. Необходимо от-

метить, что экспериментальные результаты получены в пределах изменения y , при которых пучок света не освещает электроды. Во всем диапазоне изменения y полярность сигнала ЭОВ остается постоянной. При перемещении пучка лазера вдоль оси x , параллельной электродам ($y = 0$), полярность сигнала ЭОВ также остается постоянной (рис. 6, *b*). Однако в этом случае максимальная чувствительность наблюдается вблизи свободных краев ФП. На рис. 6, *c* и *d* для сравнения представлены результаты аналогичных исследований, полученные для ФП аналогичной конструкции, изготовленного из полированного кремния. Видно, что в этом случае зависимость $\eta(y)$ при $x = 0$ (рис. 6, *c*) существенно отличается от соответствующей зависимо-

сти (рис. 6, *a*), полученной для nanoграфитной пленки. Полярность фотоэлектрического сигнала, возникающего в кремниевой пластине за счет эффекта Дембера, изменяется при переходе из области одного электрода в область другого, а амплитуда сигнала обращается в нуль вблизи значений $y = 0$. Результаты представленные на рис. 6, *d* показывают, что перемещение пучка лазера по поверхности ФП из кремниевой пластины параллельно оси x при $y = -4.5$ (1) и $+4.5$ mm (2) приводит к незначительному уменьшению абсолютной величины η при приближении к свободным краям пластины. Однако при этом значении $\eta(x)$, полученные при $y = +4.5$ и -4.5 mm, отличаются знаком. Необходимо особо отметить, что полярность фотоэлектрического сигнала, снимаемого с фотоприемника из кремниевой пластины, не зависит от угла падения. Существенное различие зависимостей $\eta(y)$, полученных для nanoграфитной пленки (рис. 6, *a*) и кремниевой пластины (рис. 6, *c*) дополнительно подтверждает различную физическую природу фотоэлектрических сигналов, возникающих в указанных материалах.

Из рис. 6, *b* следует, что чувствительность nanoграфитного пленочного ФП возрастает вблизи свободных краев. Это подтверждается дополнительными сравнительными экспериментальными исследованиями локальной чувствительности ФП прямоугольной и трапециидальной форм. Из рис. 7, *a* видно, что для ФП трапециидальной формы с параллельными электродами, расположенными вдоль оснований трапеции, перемещение пучка лазера вдоль оси y приводит к заметному изменению сигнала ЭОВ. Сигнал увеличивается с приближением пучка лазера к узкой части ФП. Результаты экспериментов, полученные при исследовании локальной чувствительности ФП прямоугольной формы, изготовленной из той же nanoграфитной пленки, показаны на рис. 7, *b*, видно, что в этом случае η практически не зависит от y .

Экспериментальные закономерности, представленные выше, на качественном уровне можно объяснить следующим образом. Проводящая поверхность nanoграфитной пленки I представима в виде достаточно мелкой сетки сопротивлений, каждое звено которой состоит из некоторого элементарного сопротивления r (рис. 8). В соответствии с [8] при ориентации плоскости ФП перпендикулярно плоскости падения лазерного луча и при угле падения, отличном от нуля, в зоне лазерного пучка на nanoграфитной пленке 2 в результате ЭОВ возникает импульсная фотоэдс ε , полярности которой обращены в сторону электродов 3. Часть тока, создаваемого этой импульсной эдс ε , протекает через сопротивление нагрузки R_{load} , представляющее собой входное сопротивление регистрирующего прибора (осциллографа). Возникают также токи утечки по многочисленным замкнутым контурам типа m , n , o , p , ..., а также по замкнутым контурам типа $MNOP$, как показано на рис. 8. Эти токи не протекают через сопротивление нагрузки R_{load} , следовательно, они не дают своего вклада в амплитуду регистрируемого сигнала, но могут значительно нагружать источник эдс. Если уменьшить

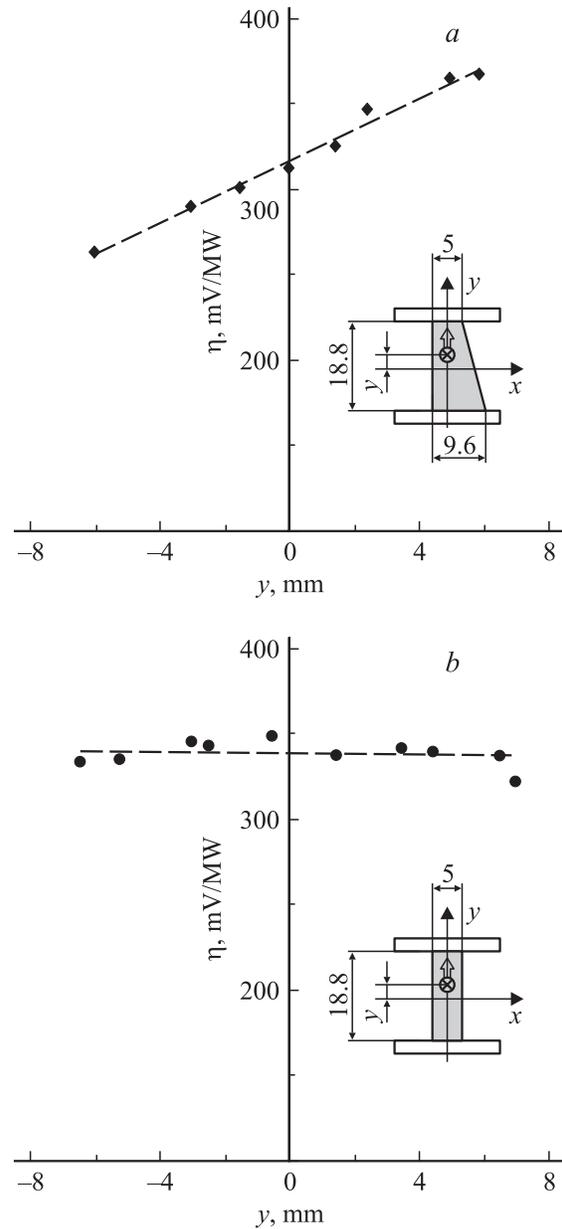


Рис. 7. Зависимости локальной чувствительности ФП из nanoграфитной пленки трапециидальной (*a*) и прямоугольной (*b*) формы при сканировании луча лазера.

ширину ФП, удалив его правую часть по линии $A'A'$ (рис. 8), то суммарный ток утечки уменьшится за счет обрыва части контуров типа o , p и $MNOP$. Очевидно, что это приведет к перераспределению токов, при этом увеличится ток через нагрузку R_{load} . Аналогичным образом последующее уменьшение ширины ФП за счет удаления левой его части по линии AA приведет к дальнейшему уменьшению токов утечки за счет обрыва контуров типа m и n . В результате амплитуда сигнала на нагрузке R_{load} увеличится еще больше. Все это находится в соответствии с экспериментальными результатами, приведенными на рис. 4.

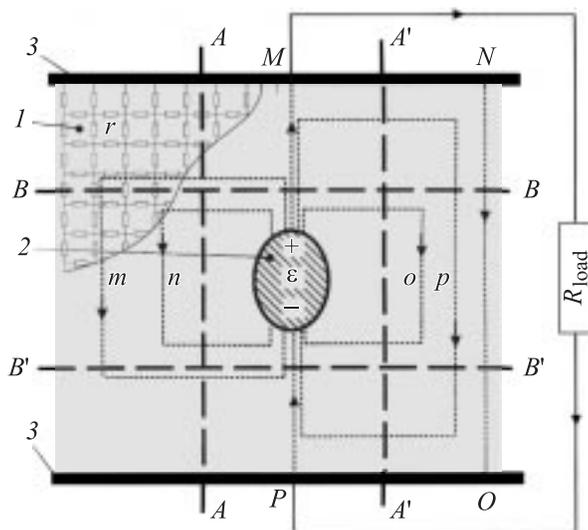


Рис. 8. Модельное представление ФП.

Теперь вновь вернемся к первоначальной ширине нанографитной пленки, но верхний и нижний электроды ФП приблизим друг к другу, расположив их вдоль линий BB' и $B'B'$ соответственно. В этом случае обрываются замкнутые контуры m и p , а соответствующие токи уже будут протекать через электроды и нагрузку. Это приведет к увеличению импульсного напряжения на входе регистрирующего осциллографа, что согласуется с экспериментальными результатами, представленными на рис. 3. Увеличение локальной чувствительности ФП вблизи свободных краев, а также экспериментальные зависимости чувствительности от длины электродов объясняются аналогично.

Заключение

Таким образом, экспериментальные результаты, представленные в данной работе, показывают, что ФП, изготовленный из нанографитной пленки и двух параллельных проводящих электродов на ее поверхности и работающий на ЭОВ, принципиально отличается от аналогичного ФП, изготовленного из кремниевой пластины, работающего на эффекте Дембера.

Фотоприемник из нанографитной пленки обладает следующими отличительными особенностями: 1) преобразует наносекундные световые импульсы в электрические соответствующей формы и длительности; 2) при фиксированном угле падения луча полярность сигнала не зависит от положения пучка на поверхности пленки; 3) амплитуда и полярность сигнала существенно зависят от угла падения [8–10]; 4) чувствительность существенно зависит от размеров пленки, а также от длины и взаимного расположения электродов, используемых для его измерения, а максимальная чувствительность достигается при размерах ФП, близких к размеру лазерного пятна на поверхности нанографитной пленки.

Соответствующий ФП из кремниевой пластины обладает совершенно другими свойствами: 1) фотоэлектрический сигнал не воспроизводит форму лазерного импульса и его длительность примерно в 20 раз больше длительности падающих импульсов; 2) при фиксированном угле падения луча полярность сигнала меняется при изменении положения пучка лазера от одного электрода к другому; 3) при облучении одной и той же выбранной точки на поверхности ФП полярность сигнала не зависит от угла падения; 4) при размерах ФП, близких к размеру лазерного пятна на поверхности кремниевой пластины, чувствительность обращается в нуль.

Авторы искренне признательны В.Я. Когаю за выполнение работ по нанесению проводящих электродов на образцы.

Один из авторов (Р.Г. Зонов) благодарит Фонд содействия отечественной науке за поддержку.

Список литературы

- [1] Измерение энергетических параметров и характеристик лазерного излучения / Под ред. А.Ф. Котюка. М.: Радио и связь, 1981. 288 с.
- [2] Ишанин Г.Г. Приемники излучения оптических и оптико-электронных приборов. Л.: Машиностроение, 1986. 175 с.
- [3] Gibson A.F., Hatch C.B., Kimmitt M.F., Kothari S., Serafetinides A. // J. Phys. C. Solid State Phys. 1977. Vol. 10. P. 905–915.
- [4] Алимбиев С.С., Валов П.М., Ярошецкий И.Д. // Письма в ЖТФ. 1978. Т. 4. Вып. 3. С. 146–148.
- [5] Рывкин С.М., Ярошецкий И.Д. // Проблемы современной физики. Л.: Наука, 1980. С. 173–184.
- [6] Ward J.F. // Phys. Rev. 1966. Vol. 143. P. 569–574.
- [7] Морозов Б.Н., Айвазян Ю.М. // Квантовая электроника. 1980. Т. 7. № 1. С. 5–32.
- [8] Mikheev G.M., Zonov R.G., Obratsov A.N., Svirko Yu.P. // Appl. Phys. Lett. 2004. Vol. 84. P. 4854–4856.
- [9] Михеев Г.М., Зонов Р.Г., Образцов А.Н., Свирко Ю.П. // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. Вып. 17. С. 88–94.
- [10] Михеев Г.М., Зонов Р.Г., Образцов А.Н., Свирко Ю.П. // ЖЭТФ. 2004. Т. 126. № 5. С. 1083–1088.
- [11] Михеев Г.М., Зонов Р.Г., Образцов А.Н., Свирко Ю.П., Волков А.П. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. Вып. 3. С. 11–57.
- [12] Михеев Г.М., Зонов Р.Г., Образцов А.Н., Волков А.П., Свирко Ю.П. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. Вып. 13. С. 50–57.
- [13] Михеев Г.М., Зонов Р.Г., Образцов А.Н., Свирко Ю.П., Волков А.П. // ПТЭ. 2005. № 4.
- [14] Павловский И.Ю., Образцов А.Н. // ПТЭ. 1998. № 1. С. 152–156.
- [15] Образцов А.Н., Волков А.П., Боронин А.И. и др. // ЖЭТФ. 2001. Т. 120. С. 970–978.
- [16] Obratsov A.N., Zolotukhin A.A., Ustinov A.O. et al. // Carbon. 2003. Vol. 41. P. 836–839.
- [17] Михеев Г.М., Малеев Д.И., Могилева Т.Н. // Квантовая электроника. 1992. Т. 19. № 1. С. 45–47.