

09;15

Фотодетектор видимого и ближнего инфракрасного диапазона длин волн на основе осажденного из газовой фазы алмаза

© В.А. Кукушкин^{1,2}, Д.Б. Радищев¹, М.А. Лобаев¹,
С.А. Богданов¹, А.В. Здравейцев³, И.И. Чунин³

¹ Федеральный исследовательский центр „Институт прикладной физики РАН“, Нижний Новгород

² Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

³ Научно-исследовательский физико-технический институт Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского
E-mail: vakuk@appl.sci-nnov.ru

Поступило в Редакцию 10 мая 2017 г.

Создан фотодетектор видимого и ближнего инфракрасного диапазона длин волн на основе осажденного из газовой фазы модулированно-легированного бором алмаза. Поглощение электромагнитного излучения происходит в тонком биметаллическом слое Cr (толщина 7 nm) и Au (толщина 5.5 nm), находящемся на поверхности осажденной алмазной пленки, состоящей из высоколегированного (до концентрации $5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) дельта-слоя с толщиной 3 nm, низколегированного ($\sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) слоя с толщиной 800 nm и высоколегированного (10^{20} cm^{-3}) слоя с толщиной $\sim 10 \mu\text{m}$, на котором сформирован омический контакт Ti(50 nm)/Pt(15 nm)/ Au(30 nm). Рождающиеся в биметаллическом слое дырки диффундируют в алмаз, ускоряются электрическим полем, создаваемым пространственным зарядом в низколегированном слое, и создают фототок. Измеренная ампер-ваттная чувствительность достигает $1 \mu\text{A/W}$ при длине волны излучения 445 nm и $0.18 \mu\text{A/W}$ при $1.06 \mu\text{m}$.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.24.45343.16860

Алмаз вследствие высокой химической и радиационной стойкости является перспективной основой фотодетекторов для атомной промышленности и космических исследований. Ввиду большой ширины запрещенной зоны (5.5 eV) алмаз обычно применяется для создания фотодетекторов для ультрафиолетового и мягкого рентгеновского диа-

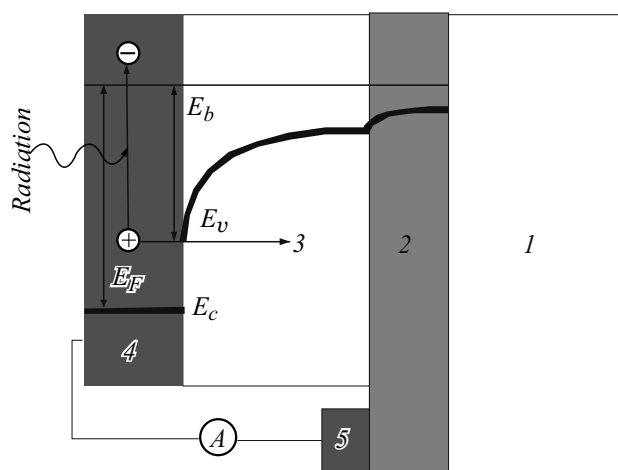


Рис. 1. Принцип действия фотодетектора: 1 — p -низколегированная алмазная подложка, 2 — p -высоколегированный контактный слой алмаза, 3 — p -низколегированный слой алмаза с областью пространственного заряда, 4 — тонкий слой металла, 5 — омический контакт, А — амперметр, E_c — нижняя граница зоны проводимости в металле, E_v — верхняя граница валентной зоны в алмазе, E_F — энергия Ферми в металле, E_b — высота потенциального барьера для перехода дырок (+) из металла в алмаз.

пазона длин волн [1–3]. Фотодетекторы важного для телекоммуникации ближнего инфракрасного диапазона с использованием алмаза могут быть основаны на изменении его сопротивления при облучении благодаря генерации дополнительных носителей заряда за счет переходов примесная зона–зона [4] или нагрева [5]. Однако вследствие трудности контролирования и воспроизведения параметров примесных зон и инерционности тепловых эффектов такие устройства не получили большого распространения.

В то же время ближний инфракрасный фотодетектор с использованием алмаза может быть основан на другом эффекте, хорошо известном в оптоэлектронике [6]. Он заключается в рождении носителей заряда (конкретно дырок) не в самом алмазе, а в прилежащем к нему тонком слое металла, служащем одновременно и одним из контактов с внешней цепью. Дырки диффундируют из металла в алмаз, где ускоряются

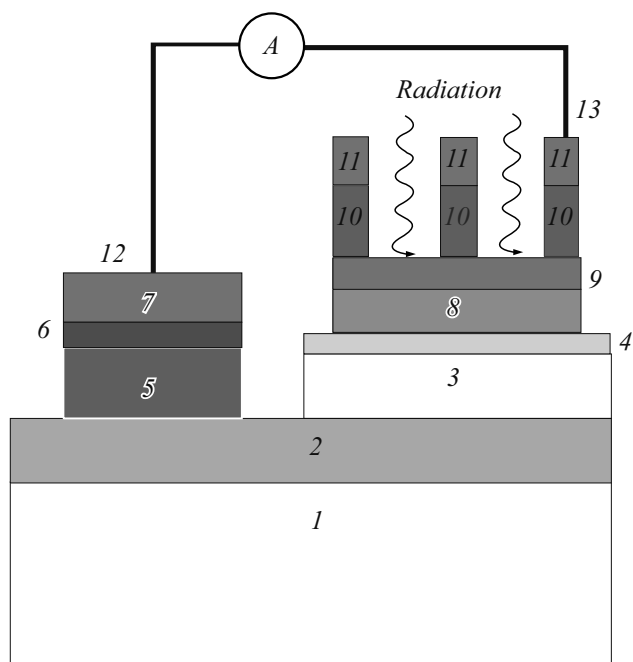


Рис. 2. Поперечное сечение фотодетектора. Расшифровка обозначений приведена в тексте.

электрическим полем области пространственного заряда и создают фототок (рис. 1). Очевидно, что наименьшая энергия фотонов, которые можно зарегистрировать таким способом, должна быть порядка E_b — разницы энергии Ферми E_F в металле и верхнего края валентной зоны E_v алмаза на его границе с металлом. Как известно [7], для контакта алмаза с металлами E_b может соответствовать ближнему инфракрасному диапазону длин волн.

Задача настоящей работы — реализовать основанный на этом эффекте ближний инфракрасный алмазный фотодетектор. Для этого (рис. 2) на полуизолирующей подложке I из выращенного при высоком давлении и температуре (НРНТ) алмаза размером $3.5 \times 3.5 \times 0.5$ mm (New Diamond Technology) на оригинальном реакторе, созданном в Институте прикладной физики РАН [8], был выращен слой осажденного из газовой

фазы (CVD) алмаза. Он состоял (снизу вверх) из занимающего всю поверхность подложки толстого высоколегированного бором (до концентрации 10^{20} cm^{-3}) слоя 2 с толщиной $\sim 10 \mu\text{m}$ и занимающих примерно половину поверхности подложки низколегированного бором (до концентрации $\sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, определяемой остаточным содержанием бора в реакторе) слоя 3 толщиной 800 nm и тонкого высоколегированного бором (до концентрации $5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) дельта-слоя 4 толщиной 3 nm. Нанесение на низколегированный слой высоколегированного дельта-слоя [9] позволяет сузить верхнюю часть потенциального барьера Шоттки для дырок на границе алмаза с металлом и тем самым повысить его туннельную прозрачность, т.е. сделать возможным прохождение из металла в алмаз дырок с энергиями, меньшими высоты данного барьера. Это повышает чувствительность фотодетектора в ближнем инфракрасном диапазоне длин волн. В то же время использование для сужения барьера Шоттки высоколегированного тонкого дельта-слоя, а не однородного сильнолегированного слоя позволяет снизить емкость области пространственного заряда и тем самым повысить потенциальное быстродействие фотодетектора.

Далее для формирования омического контакта на непокрытую часть толстого высоколегированного слоя 2 через маску при температуре 300°C последовательно наносились слои Ti 5 (толщина 50 nm), Pt 6 (15 nm) и Au 7 (30 nm), после чего осуществлялся отжиг в атмосфере Ag при давлении $4 \cdot 10^{-2} \text{ Torr}$ и температуре 550°C в течение 60 min. Затем омический контакт закрывался защитной полоской, а на поверхность дельта-слоя 4 при 300°C наносился фоточувствительный контакт, состоящий из слоев Cr 8 (7 nm), Au 9 (5.5 nm), Ti 10 (50 nm) и Au 11 (30 nm). Далее на его поверхности методом фотолитографии и последующего химического травления слоя Au 11 и слоя Ti 10 создавалась сетка с размером ячеек примерно $200 \times 200 \mu\text{m}$ и шириной полосок Ti/Au между ячейками около $10 \mu\text{m}$. Сетка позволяла уменьшить сопротивление фоточувствительного контакта без существенной потери площади фоточувствительной поверхности (т.е. открытой площади тонкого биметаллического слоя Cr/Au). В конце выполнялась пайка внешних контактов 12 и 13 к омическому контакту и сетке соответственно и их подсоединение к амперметру А.

Толщина биметаллического слоя Cr/Au была выбрана из следующих соображений. С одной стороны, она не должна существенно превышать длину диффузии дырок l_d , поскольку в противном случае большая часть рождающихся в этом слое за счет поглощения детектируемого

излучения дырок будет рекомбинировать с электронами, не успев дойти до его границы с алмазом, и фототок, а следовательно, и чувствительность фотодетектора будут низкими. С другой стороны, существенное уменьшение толщины биметаллического слоя по сравнению с l_d также приведет к уменьшению фототока и чувствительности, поскольку уменьшится количество поглощаемых в этом слое квантов детектируемого излучения. Таким образом, оптимальной толщиной биметаллического слоя является величина l_d . Для оценки последней пренебрежем биметаллическостью слоя, т.е. будем считать, что он состоит только из Cr. Величину l_d оценим по известной формуле теории броуновского движения $l_d \sim l_f \sqrt{\tau_r/\tau_f}$, где l_f — длина свободного пробега дырки по отношению к излучению ей фононов, $\sqrt{\tau_r/\tau_f}$ — число актов излучения дыркой фононов до ее рекомбинации с электроном, τ_r — время, за которое дырка рекомбинирует с электроном, τ_f — время между актами излучения дыркой фонона. Величину l_f оценим с помощью выражения $l_f \sim v\tau_f$, где $v \sim \sqrt{E_F/m}$, v — скорость дырки в Cr вблизи поверхности Ферми, $E_F \sim 7 \text{ eV}$ — энергия Ферми Cr, m — масса дырки, равная по порядку величины массе свободного электрона. Из данных для электропроводности Cr найдем, что время τ_f примерно равно 3 fs. Время рекомбинации τ_r оценим по формуле $\tau_r \sim \tau_f \hbar\omega/E_f$, где \hbar — постоянная Планка, ω — частота детектируемого излучения, $E_f \sim 25 \text{ meV}$ — оцененная по температуре Дебая характерная энергия фонона в Cr. Данная формула получается из условия, согласно которому для рекомбинации с электроном дырка должна потерять приобретенную от детектируемого фотона энергию $\sim \hbar\omega$, для чего ей нужно излучить $\hbar\omega/E_f$ фононов, а время между актами их излучения равно τ_f . В результате для излучения ближнего инфракрасного диапазона длин волн находим, что $l_d \sim 10 \text{ nm}$. Эта величина, согласно указанному выше, и является оптимальной толщиной фоточувствительного биметаллического слоя для детектирования электромагнитного поля данной частотной области.

Для измерения ампер-ваттной чувствительности фотодетектора (т.е. отношения силы фототока к мощности падающего излучения при замыкании внешних контактов через амперметр) в видимом диапазоне длин волн использовался работающий в непрерывном режиме полупроводниковый диодный лазер NDB 7412T (NICHIA) с длиной волны излучения 445 nm и мощностью 1 W. Площадь поперечного сечения ($5 \times 1.3 \text{ mm}$) его пучка была примерно в 2 раза больше площади

фоточувствительного контакта фотодетектора ($3 \times 1 \text{ mm}$), так что мощность падающего на него излучения оценивалась величиной 0.5 W . При этом был измерен фототок $0.6\text{--}0.7 \mu\text{A}$, что дает ампер-ваттную чувствительность порядка $1 \mu\text{A/W}$.

Ампер-ваттная чувствительность фотодетектора в ближнем инфракрасном диапазоне длин волн была измерена с помощью импульсного (частота следования импульсов 50 kHz) волоконного лазера YLP-1-100-50-50-RG (IRE-Polus) с длиной волны излучения $1.06 \mu\text{m}$ и средней мощностью 0.27 W . Площадь поперечного сечения его пучка была меньше площади фоточувствительного контакта фотодетектора, поэтому измеренный фототок $0.03\text{--}0.05 \mu\text{A}$ свидетельствовал об ампер-ваттной чувствительности порядка $0.18 \mu\text{A/W}$. Эта величина более чем на два порядка ниже расчетной чувствительности в ближнем инфракрасном диапазоне длин волн [9]. Данное расхождение, по видимому, объясняется следующими причинами. Во-первых, на поверхности фоточувствительного биметаллического слоя отсутствовало использованное в расчетах антиотражающее покрытие, так что значительная часть падающего излучения отражалась от структуры. Во-вторых, была реализована псевдовертикальная схема фотодетектора, в которой фоточувствительный и омический контакты располагались на одной и той же стороне НРНТ-алмазной подложки, а протекание фототока между ними происходило по достаточно тонкому высоколегированному слою CVD-алмаза, в то время как при расчетах рассматривалась вертикальная схема, в которой эти контакты располагались на разных сторонах тонкой высоколегированной подложки. В результате омическое сопротивление для протекания фототока в реализованной схеме фотодетектора было значительно выше, чем в расчетной. В-третьих, при расчетах рассматривался омический контакт с алмазом, обладающий наименьшим достижимым в настоящее время контактным сопротивлением, в то время как сопротивление изготовленного нами омического контакта было больше. В-четвертых, при расчетах не учитывалась рекомбинация рожденных детектируемым излучением дырок с возбужденными электронами, в то время как в эксперименте, несмотря на то что толщина фоточувствительного биметаллического слоя не превышает существенно длину диффузии дырок, часть рожденных дырок рекомбинирует с возбужденными электронами еще до достижения дырками границы металла с алмазом и потому не вносит вклада в фототок.

Таким образом, экспериментально доказана возможность создания обладающего высокой радиационной и химической стойкостью фотодетектора видимого и ближнего инфракрасного излучения на осажденном из газовой фазы алмазе.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 16-02-00450-а).

Список литературы

- [1] *Collins A.T.* // CVD diamond for electronic devices and sensors / Ed. R.S. Sussmann, Chichester: Wiley, 2009. P. 165–184.
- [2] *Гуляев Ю.В., Чучева Г.В., Набиев А.Э., Алтухов А.А., Попов А.В., Феценко В.С., Шепелев В.А.* // Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61. № 4. С. 395–398.
- [3] *Ильичев Э.А., Кулешов А.Е., Набиев Р.М., Петрухин Г.Н., Рычков Г.С., Твердовская Е.Г.* // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. В. 7. С. 48–55.
- [4] *Bruzzi M., Hartjes F., Lagomarsino S., Menichelli D., Mersi S., Miglio S., Scaringella M., Sciortino S.* // Phys. Status Solidi A. 2003. V. 199. Iss. 1. P. 138–144.
- [5] *Majdi S., Kolahdouz M., Moeen M., Kovi K.K., Balmer R.S., Radamson H.H., Isberg J.* // Appl. Phys. Lett. 2014. V. 105. Iss. 16. P. 163510 (1–4).
- [6] *Sze S.M.* // Physics of semiconductor devices. N.Y.: Wiley, 1981. Ch. 13. [Зи С. // Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир, 1984. Т. 2. С. 357].
- [7] *Butler J.E., Geis M.W., Krohn K.E., Lawless J., Jr., Deneault S., Lyszczyarz T.M., Flechtner D., Wright R.* // Semicond. Sci. Technol. 2003. V. 18. N 3. P. S67–S71.
- [8] *Vikharev A.L., Gorbachev A.M., Lobaeв M.A., Muchnikov A.B., Radishev D.B., Isaev V.A., Chernov V.V., Bogdanov S.A., Drozdov M.N., Butler J.E.* // Phys. Status Solidi. RRL. 2016. V. 10. Iss. 4. P. 324–327.
- [9] *Kukushkin V.A., Bogdanov S.A.* // Diamond Rel. Mater. 2015. V. 60. P. 94–98.