

Оптоэлектронное переключение в алмазе и оптический пробой

Е.И.Липатов, В.Ф.Тарасенко

Исследовано оптоэлектронное переключение в двух образцах природного алмаза типа 2-А при напряжениях до 1000 В и плотностях энергии до 0.6 Дж/см² управляющего лазерного излучения с длиной волны 308 нм и длительностью 60 нс по полувысоте. Показано, что конструкция алмазного коммутатора влияет на эффективность переключения. Обнаружено, что при плотностях энергии свыше 0.2 Дж/см² в случае полной засветки межэлектродной поверхности возникает оптический пробой, стимулированный УФ излучением, который шунтирует протекание тока через алмазный кристалл. Исключение засветки межэлектродной поверхности приводит к предотвращению оптического пробоя. Пороговые плотности энергии излучения, достаточные для возникновения оптического пробоя, определены при напряженностях электрического поля до 10 кВ/см.

Ключевые слова: алмаз, коммутатор, лазер, оптический пробой, эффективность переключения.

1. Введение

Для ряда приложений сильноточной электроники требуются компактные твердотельные коммутаторы большой мощности, способные работать при высоких частотах повторения импульсов. Создание таких коммутаторов предполагает использование широкозонных полупроводников, поскольку необходимо обеспечить высокую электрическую прочность и большое удельное сопротивление для предотвращения пробоя и минимизации токов утечки.

Из множества полупроводников, которые могли бы служить материалом для высоковольтного коммутатора, наиболее подходящими характеристиками обладает алмаз, т. к. он имеет высокое темновое удельное сопротивление (более 10¹² Ом·см), большую электрическую прочность (свыше 1 МВ/см) и наивысшую при комнатной температуре теплопроводность (до 25 Вт·см⁻¹·К⁻¹, что в 3–5 раз больше, чем у меди). Кроме того, алмаз стабилен и химически инертен ко многим реагентам до температур ~700 °С, а также характеризуется высокой радиационной стойкостью.

Поскольку эффективные р–п-переходы в алмазе пока еще не созданы, для управления алмазными коммутаторами необходимо генерировать неравновесные носители заряда с помощью внешнего воздействия. Пучок электронов обеспечивает высокую эффективность переключения [1, 2], но его использование предполагает наличие вакуумной системы и высоковольтной цепи управляющей системы коммутатора. Поэтому для управления алмазными коммутаторами применяется УФ излучение [3–12].

Для достижения высоких плотностей импульсного тока необходимо использовать высокоинтенсивное УФ

излучение. При этом возникает вероятность оптического пробоя кристалла, что накладывает ограничения на интенсивность или, точнее, плотность энергии излучения.

Целью настоящей работы было исследование зависимости эффективности переключения от напряженности электрического поля для коммутаторов различной геометрии на основе алмаза типа 2-А при управлении лазерным излучением с длиной волны $\lambda = 308$ нм. Было обнаружено, что при высоких плотностях энергии излучения возможно развитие оптического пробоя, стимулированного УФ излучением, который шунтирует протекание тока через кристалл, что вызывает изменение характера зависимости эффективности переключения от напряженности поля.

2. Эффективность переключения коммутатора

Важным рабочим параметром коммутатора является эффективность переключения, определяемая сопротивлением в открытой фазе. Для коммутатора на основе фотопроводника, управляемого световым импульсом, эффективность переключения

$$\eta = \frac{U_m}{U_0} = \frac{R_L}{R_{\min} + R_L}, \quad (1)$$

где U_m – амплитуда напряжения, измеряемая на нагрузке; U_0 – коммутируемое напряжение; R_L – сопротивление нагрузки; R_{\min} – минимальное сопротивление коммутатора.

Согласно [13] сопротивление фотопроводника без учета влияния контактов

$$R = \frac{l}{en\mu S}, \quad (2)$$

где l и S – длина и площадь сечения фотопроводника; e – элементарный заряд; n и μ – концентрация и подвижность фотоносителей.

Е.И.Липатов, В.Ф.Тарасенко. Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, 634055 Томск, просп. Академический, 2/3; e-mail: lipatov@loi.hcei.tsc.ru

Поступила в редакцию 14 мая 2007 г., после доработки – 11 июля 2007 г.

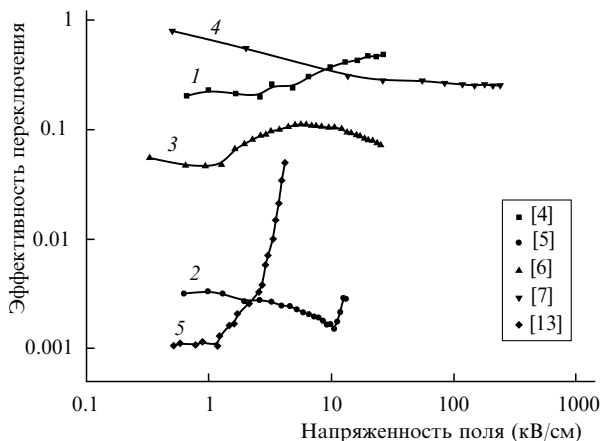


Рис.1. Зависимости эффективности переключения от напряженности приложенного электрического поля, рассчитанные на основе литературных данных.

Очевидно, что увеличение интенсивности излучения приводит к росту концентрации неравновесных носителей заряда в фотопроводнике, в результате чего уменьшается сопротивление и, следовательно, увеличивается эффективность переключения. В то же время увеличение коммутируемого напряжения при неизменной интенсивности излучения приводит к уменьшению подвижности носителей заряда, что справедливо для всех полупроводников [14] и для алмаза в частности [15, 16]. Это должно приводить к увеличению сопротивления коммутатора и снижению эффективности переключения с ростом напряжения.

На рис.1 приведены зависимости эффективности переключения от напряженности электрического поля, рассчитанные на основе известных литературных данных [4–7, 13]. Только поведение кривой 4 соответствовало тенденции, описываемой выражениями (1) и (2). В остальных случаях участок слабого снижения эффективности переключения в области малых напряженностей поля сменялся участком роста. При этом в токовом импульсе алмазного коммутатора появлялась «аномальная компонента», которая искажала форму импульса [6, 10], вызывала значительное увеличение длительности импульса [5, 6, 10] или наблюдалась с задержкой [5, 7, 12, 13, 15]. Для объяснения появления аномальной компоненты импульсного фототока предлагались: механизм инжекции фотодырок ввиду накопления объемного заряда на ловушках в приконтактной области [4–7, 11], оптоэлектронная неустойчивость [13, 15], а также поверхностный пробой, стимулированный УФ излучением [7]. Тщательное исследование процесса возникновения аномальной компоненты фототока в алмазных коммутаторах показало, что, по крайней мере в [11], этот пробой вызван большими плотностями энергии излучения. Предварительные результаты данных исследований были изложены в [12].

3. Приборы и методика эксперимента

В настоящей работе исследовалось оптоэлектронное переключение в двух образцах, схемы которых представлены на рис.2. Образец №1 – детектор излучений (произведен Alameda Applied Science Corp.) на основе монокристалла природного алмаза типа 2-А с размерами $3 \times 1 \times 0.5$ мм, помещенный в 50-омный коаксиальный держав

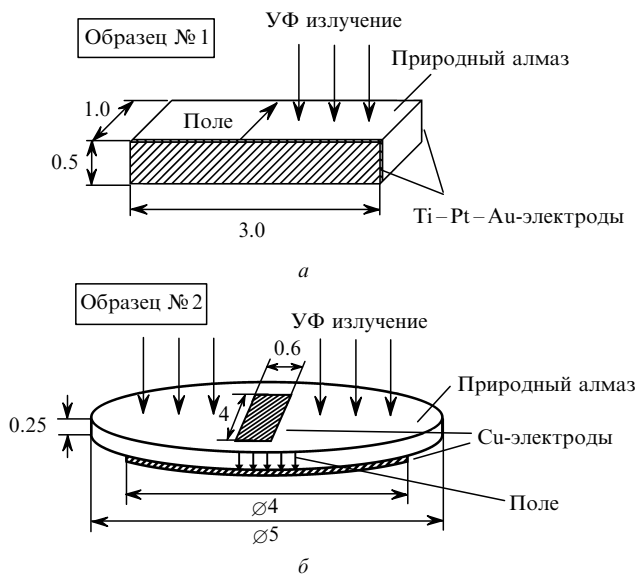


Рис.2. Схематичные изображения алмазных коммутаторов. Приведенные размеры даны в миллиметрах.

тель аналогично [9]. Электрические контакты к алмазному кристаллу были выполнены последовательным напылением слоев Ti – Pt – Au на противоположные грани с размерами 3×0.5 мм.

Образец №2 на основе алмазного кристалла того же типа представлял собой диск с диаметром 5 мм и толщиной 0.25 мм и имел медные контакты, сформированные вакуумно-дуговым напылением [17]. На одну сторону алмазного диска был напылен круглый электрод $\varnothing 4$ мм, а на другую – прямоугольный электрод с размерами 4×0.6 мм.

У образца №1 равномерно облучалась грань 3×1 мм, т.е. весь межэлектродный зазор. При этом излучение распространялось ортогонально вектору напряженности приложенного электрического поля. В случае образца №2 облучалась сторона с меньшим электродом, а излучение распространялось параллельно вектору напряженности приложенного электрического поля. Для предотвращения возникновения пробоя по поверхности образца №2 перед облучаемой боковой гранью кристалла устанавливалась диафрагма диаметром 2–4 мм, не показанная на схеме.

Один из контактов кристалла подключался к нагрузке с $R_L = 25$ Ом, другой – к конденсатору емкостью $C = 67$ нФ, который заряжался через ограничивающее сопротивление от источника постоянного напряжения. Зарядное напряжение емкости U_0 варьировалось в диапазоне 10–1000 В.

Для управления алмазными коммутаторами использовалось импульсное излучение ($\lambda = 308$ нм, длительность ~ 60 нс по полувысоте) лазерной установки ЛИДА-Т, разработанной в ИСЭ СО РАН [18].

При лазерном облучении алмазного кристалла его сопротивление уменьшалось и коммутируемый конденсатор разряжался через сопротивление алмаза и нагрузку. Напряжение на нагрузке регистрировалось цифровыми осциллографами TDS-220 или TDS-224 (Tektronix Inc.). Энергия излучения измерялась пироэлектрическим датчиком PE50-BB (Ophir Optonics Ltd). Подробнее методики измерений интенсивности излучения и амплитуды фототока описаны в [10].

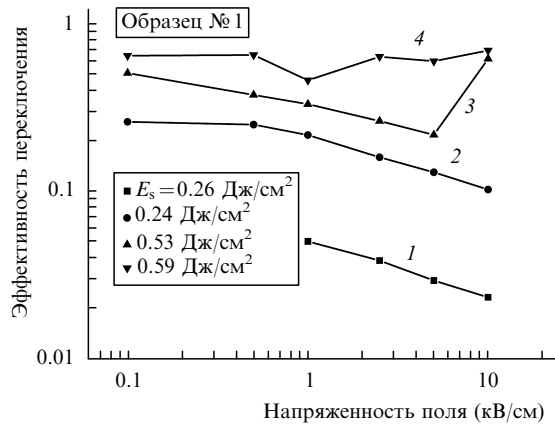


Рис.3. Зависимости эффективности переключения от напряженности приложенного поля для образца №1 при различных плотностях энергии излучения ($\lambda = 308$ нм).

4. Экспериментальные данные и их обсуждение

Для образца №1 характер зависимости эффективности переключения от напряжения менялся с увеличением плотности энергии излучения. При плотностях энергии до 0.2 Дж/см² эффективность переключения монотонно снижалась с ростом напряженности электрического поля (рис.3, кривые 1 и 2), что соответствует тенденции, описываемой формулами (1) и (2). В интервале напряженностей $0.1 - 10$ кВ/см эффективность переключения снижалась примерно в 2.5 раза. При увеличении плотности энергии излучения эффективность переключения снижалась с ростом напряженности поля лишь до некоторого порогового значения, затем наблюдалось ее резкое увеличение (рис.3, кривые 3 и 4) и далее она практически не менялась, т. е. сопротивление коммутатора становилось постоянной величиной. Однако, как отмечалось выше, из-за снижения подвижности носителей заряда в полупроводниках с ростом напряженности поля закон Ома не выполняется и сопротивление полупроводника нарастает [14–16].

Пороговая напряженность поля, при которой изменяется характер зависимости эффективности переключения, была тем меньше, чем выше была плотность энергии (см. рис.4). «Омическая» область эффективности переключения соответствовала режиму пробоя по поверхно-

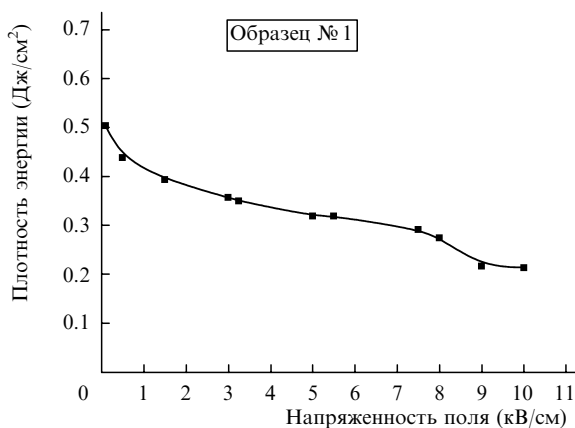


Рис.4. Зависимость пороговой плотности энергии излучения на $\lambda = 308$ нм, при которой происходит пробой поверхности образца №1, от напряженности приложенного поля.

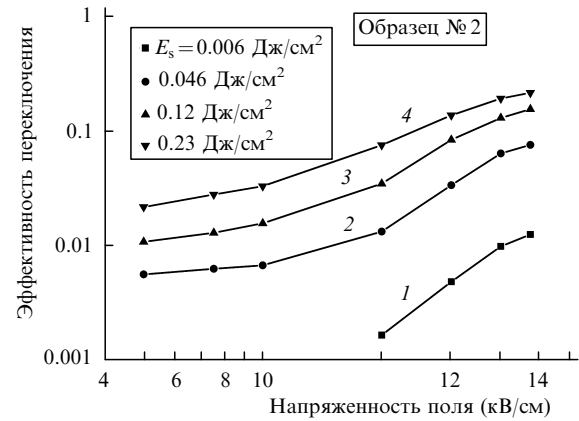


Рис.5. Зависимости эффективности переключения от напряженности приложенного поля для образца №2 при различных плотностях энергии излучения ($\lambda = 308$ нм).

сти кристалла, что отражалось на осциллограммах тока [11, 12] и наблюдалось визуально [12].

Для образца №2 эффективность переключения растет с увеличением приложенного напряжения (рис.5), однако в данном случае такое поведение не связано с пробоем по поверхности. В исследованном интервале приложенных полей осциллограммы токовых и световых импульсов практически совпадали. Пробой по поверхности возник лишь при высоких плотностях энергии и напряженностях поля (0.2 Дж/см² и 50 кВ/см), что наблюдалось на осциллограммах фототока. Необходимым условием возникновения поверхностного пробоя являлось освещение боковой грани образца. Установка диафрагмы диаметром $2 - 4$ мм перед образцом приводила к подавлению пробоя [12], что соответствует рекомендациям авторов работы [7].

Обсуждение характера зависимости эффективности переключения от напряжения для образца №2 выходит за рамки данной статьи. Отметим лишь, что имеющая место сильная «неомичность» контактов к алмазу вызвана, по-видимому, их геометрией, способом формирования и материалом. С увеличением приложенного поля эффективность переключения выходит на насыщение (рис.5). Предположительно дальнейшее увеличение поля приводит к достижению максимума эффективности переключения и к ее последующему снижению вследствие уменьшения подвижности носителей заряда.

5. Заключение

Проведенные нами исследования показали, что использование алмазного коммутатора, в котором УФ излучение распространяется ортогонально вектору напряженности электрического поля (образец №1), приводит к уменьшению эффективности переключения примерно в 2.5 раза с ростом напряжения до 1000 В. Но для устройства, в котором УФ излучение распространяется параллельно вектору напряженности электрического поля (образец №2), эффективность переключения в том же интервале напряжений увеличивается на порядок.

При плотностях энергии более 0.2 Дж/см² в образце №1 обнаружено развитие поверхностного пробоя, стимулированного УФ излучением. Пороговая плотность энергии излучения, необходимая для инициирования пробоя, уменьшается с ростом напряженности электрического поля. Таким образом, в алмазном коммутаторе с

возможностью полной засветки межэлектродной поверхности кристалла (образец № 1) развитие поверхностного пробоя ограничивает диапазон рабочих напряжений и интенсивностей излучения. В случае, когда конструкция позволяет управлять коммутатором без полной засветки межэлектродной поверхности алмаза (образец № 2 с диафрагмой, установленной перед облучаемой поверхностью), рабочие напряжения и интенсивности могут быть существенно увеличены благодаря предотвращению развития пробоя, стимулированного УФ излучением.

Авторы благодарят М.Кришнана и Дж.Томпсона за предоставление образцов для исследований, а также И.М.Гончаренко и И.Лопатина за напыление медных контактов к образцу.

1. Joshi R.P., Kennedy M.K., Schoenbach K.H. *J. Appl. Phys.*, **72**, 4781 (1992).
2. Krishnan M., Xu X., Schein J. *Proc. 1999 IEEE Pulsed Power Conf.*, (CA, USA, 1999, p. 1222).
3. Ho P.-T., Lee C.H., Stephenson J.C. *Opt. Commun.*, **46**, 202 (1983).
4. Bharadwaj P.K., Code R.F., van Driel H.M. *Appl. Phys. Lett.*, **43**, 207 (1983).
5. Glinski J., Gu X.-J., Code R.F. *Appl. Phys. Lett.*, **45**, 260 (1984).
6. Huo Y.S., Gu X.-J., Code R.F. *J. Appl. Phys.*, **59**, 2060 (1986).
7. Feng S., Ho P.-T., Goldhar J. *IEEE Trans. Electron. Devices*, **37**, 2511 (1990).
8. Yoneda H., Ueda K.-I., Aikawa Y. *Appl. Phys. Lett.*, **66**, 460 (1995).
9. Prasad R., Schein J., Gensler S.W. *Proc. 1999 IEEE Pulsed Power Conf.* (CA, USA, 1999, p. 142).
10. Липатов Е.И., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. *Квантовая электроника*, **31**, 1115 (2001).
11. Липатов Е.И., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. *Оптика атмосферы и океана*, **17**, 215 (2004).
12. Lipatov E.I., Panchenko A.N., Tarasenko V.F. *Proc. 2004 Intern. Symp. on High Current Electronics* (Tomsk, Russia, 2004, p. 187).
13. Квасков В.Б. *Алмаз в электронной технике* (М.: Энергоатомиздат, 1990).
14. Шалимова К.В. *Физика полупроводников* (М.: Энергия, 1976).
15. Квасков В.Б. *Природные алмазы России* (М.: Полярон, 1997).
16. Pan L.S., Han S., Kania D.R. *J. Appl. Phys.*, **74**, 1086 (1993).
17. Schanin P.M., Koval N.N., Kozyrev A.V. *J. Tech. Phys.*, **41** (2), 177 (2000).
18. Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. *Квантовая электроника*, **20**, 663 (1993).