

Неполяризующиеся детекторы излучений на основе монокристаллов широкозонных полупроводников

© П.Г. Кашерининов, А.Н. Лодыгин, С.С. Мартынов*, В.С. Хрунов*

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

* Институт физико-технических проблем,
Дубна, Россия

(Получена 15 марта 1999 г. Принята к печати 11 июня 1999 г.)

Широкозонные изолирующие полупроводниковые кристаллы весьма перспективны для создания фотоэлектрических приборов, особенно детекторов электромагнитных и ядерных излучений, но широко не используются из-за поляризации приборов в процессе работы. В процессе работы в детекторах на таких кристаллах с большой концентрацией глубоких примесных уровней накапливаются электрические заряды, вызывающие изменение со временем напряженности электрического поля в кристалле и величины фототклика детектора. Так как избавиться от примесных центров в таких кристаллах в настоящее время не представляется возможным, предлагаются новые подходы к созданию на них неполяризующихся со временем детекторов-дозиметров излучений, основанные на полезном использовании образующихся в них поляризованных зарядов.

Дозиметры излучений

Предлагается реализовать детекторы, в которых величина поляризованного заряда ограничивается некоторой предельной фиксированной величиной. При достижении этой величины поляризованный заряд покидает кристалл, на его месте начинает образовываться новый заряд и т.д. Вытекание поляризованных зарядов из кристалла будет сопровождаться появлением во внешней цепи детектора коротких периодических токовых (реперных) импульсов. За время между двумя соседними импульсами в кристалле детектора накапливается заданная фиксированная величина электрического заряда, при этом на поверхность детектора падает строго определенная доза излучения. Такой детектор может служить дозиметром излучения [1,2].

Предлагаемый дозиметр может быть реализован на базе полупроводниковых структур типа металл-газовый диэлектрик-монокристаллический широкозонный изолирующий полупроводник-металл, т.е. М(ГД)ПМ структур. Газовый слой в такой структуре в зависимости от величины напряженности электрического поля в нем будет находиться в одном из бистабильных состояний: низкопроводящем при малой напряженности электрического поля или высокопроводящем (газовый разряд, обусловленный процессами ударной ионизации и фотоионизации) при большой напряженности электрического поля в газовом слое. Сопrotивление газового слоя в этих состояниях различается на много порядков, переход одного бистабильного состояния в другое происходит при определенном пробойном напряжении, зависящем от многих внешних параметров (толщины газового слоя, давления, температуры и т.д. [3]). Как показано в [2], при приложении к описанной выше структуре внешнего напряжения ($V_{00} = 1 \div 2$ кВ) напряженность электрического поля в полупроводниковом кристалле и газовом слое оказывается существенно различной из-за различия

их диэлектрических проницаемостей. Напряженность поля в газовом слое при этом во много раз выше, чем в кристалле, и оказывается близкой к пробойному значению [2].

В отсутствие освещения такое распределение поля в структуре сохраняется неизменным длительное время. При освещении структуры светом, фотоактивно поглощаемом в материале кристалла, характер распределения напряженности электрического поля между слоями структуры существенно изменится. Созданные в кристалле светом свободные фотоносители под действием электрического поля в кристалле будут увлекаться к соответствующим электродам, вызывая во внешней цепи структуры фототок, постоянный или импульсный (при импульсном освещении структуры). Так как газовый диэлектрик оказывается непроходимым для фотоносителей, на границе с газовым слоем в кристалле начинает накапливаться электрический заряд. Как показано в [2], в результате накопления заряда напряженность электрического поля в кристалле со временем начинает уменьшаться, а в газовом слое увеличиваться. Импульсы фототока во внешней цепи детектора начинают уменьшаться со временем по амплитуде при неизменном импульсном освещении структуры. При определенной фиксированной величине электрического заряда на границе с газовым слоем напряженность электрического поля в газовом слое достигает пробойного напряжения. Пробой газового слоя сопровождается лавиной ионизованных носителей: электронов и положительно заряженных ионов [3]. Заряд этих носителей уменьшает образовавшийся на границе воздушного конденсатора поляризованный электрический заряд до такой величины, что напряженность электрического поля в газовом зазоре оказывается меньше критического значения. При этом газовый разряд прекращается и газовый слой возвращается в низкопроводящее состояние. Во время газового

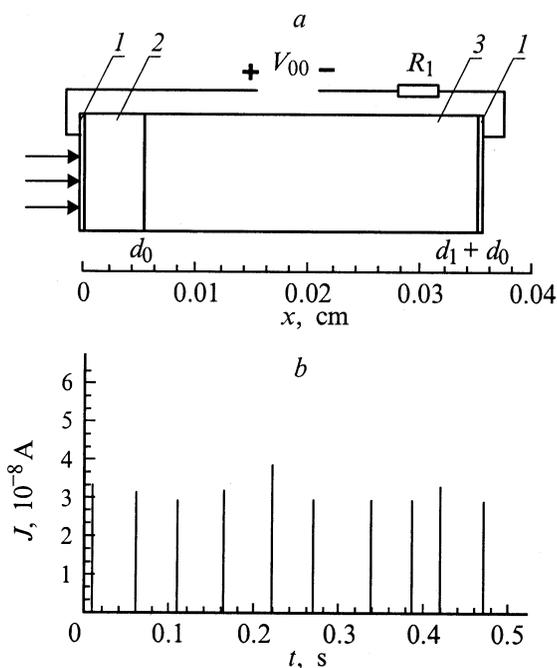


Рис. 1. Фотоответ алмазного дозиметра на М(ГД)ПМ структуре при стационарном ультрафиолетовом облучении. *a* — схема эксперимента: 1 — оптически прозрачные электроды, 2 — слой газового диэлектрика толщиной $d_0 = 6 \cdot 10^{-5}$ м, 3 — изолирующий кристалл природного алмаза толщиной $d_1 = 3 \cdot 10^{-4}$ м, R_1 — нагрузочное сопротивление. *b* — импульсы тока газового разряда (J) во внешней цепи дозиметра при его стационарном освещении; $V_{00} = 1300$ В.

разряда во внешней цепи структуры протекает короткий токовый импульс. После прекращения газового разряда напряженность поля в кристалле увеличивается в соответствии с величиной оставшегося поляризационного заряда на границе с газовым слоем. При постоянном освещении структуры газовый пробой будет носить циклический характер. При этом импульсы фотоотклика в цепи структуры не связаны непосредственно с газовым пробоем. Как показано в [1,4], в подобных структурах со стабильным твердым диэлектриком (слюда) при освещении структуры фотоактивно поглощаемым в кристалле светом во внешней цепи структуры протекает фототок, который по мере образования поляризационного заряда на границе со слюдой уменьшается со временем до нуля в результате уменьшения до нуля напряженности электрического поля в кристалле. Использование в структуре бистабильного газового диэлектрика удается периодически возвращать структуре исходное распределение напряженности электрического поля между ее слоями в условиях ее постоянного облучения и тем самым реализовать на таких структурах неполяризующийся со временем детектор–дозиметр излучения.

При стационарном облучении во внешней цепи структуры протекают периодические токовые импульсы, измеряющие энергию (дозу) падающего излучения. Доза

падающего на поверхность детектора излучения за время между двумя последовательными токовыми (реперными) импульсами газового разряда определяется величиной приложенного к структуре напряжения и не зависит от интенсивности излучения и размеров освещаемой площади детектора. Доза излучения за фиксированный интервал времени определяется количеством токовых импульсов за этот интервал времени [1,2]. На рис. 1 представлен фотоответ такого типа дозиметра при его стационарном облучении. Видна последовательность импульсов тока (J) газового разряда во внешней цепи структуры во времени (t). Энергия излучения, падающая на поверхность структуры за время между двумя последовательными токовыми импульсами, составляет при этом напряжении $2.2 \cdot 10^{-6}$ Дж. Такие дозиметры оригинальны, пригодны для оперативного контроля энергии электромагнитного [1] и ядерного [2] излучения.

Детектор–дозиметр импульсного излучения

При облучении структуры периодическим импульсным излучением во внешней цепи ее протекают два типа токовых импульсов: высокие редкие импульсы и импульсы малой амплитуды с частотой следования импульсов излучения (рис. 2).

Первый тип токовых импульсов обусловлен газовым разрядом и определяет энергию (дозу) падающего импульсного излучения за время между двумя последовательными разрядными импульсами. Другой тип токовых импульсов обусловлен фотоответом от импульсов регистрируемого излучения и измеряет их форму и интенсивность (рис. 2).

Каждый фотоимпульс регистрируемого излучения создает определенный поляризационный заряд в кристалле на границе газового слоя, который уменьшает напряженность электрического поля в кристалле. В результате этого фотоответ во внешней цепи детектора от каждого из последующих фотоимпульсов будет в общем случае меньше предыдущего до тех пор, пока суммарный поляризационный заряд в кристалле не достигнет критической величины, обуславливающей пробой слоя. После очередного газового пробоя распределение напряженности электрического поля в структуре возвращается к исходному темновому значению предыдущего цикла. Поэтому цуг импульсов фотоответа от периодических фотоимпульсов одинаковой амплитуды в общем случае уменьшается от одного разрядного токового импульса к другому (рис. 2, *a*). В неполяризующихся детекторах амплитуды импульсов фотоответа от всех фотоимпульсов должны быть одинаковыми. Такие детекторы на структурах типа М(ГД)ПМ могут быть реализованы несколькими способами.

Один из путей создания неполяризующихся детекторов на М(ГД)ПМ структурах на кристаллах малой площади заключается в увеличении приложенного к

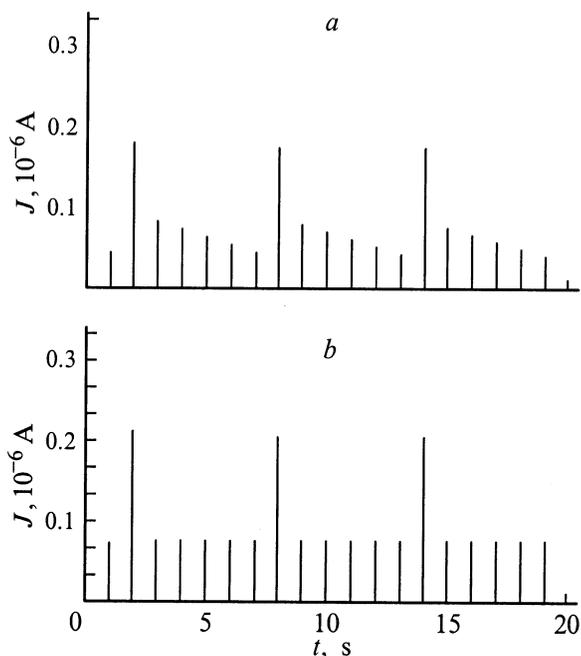


Рис. 2. Фотоответ алмазного дозиметра на М(ГД)ПМ структуре при импульсном ультрафиолетовом облучении: импульсы тока (J) во внешней цепи детектора. Длина волны $\lambda = 0.337 \cdot 10^{-6}$ м; площадь освещаемой поверхности детектора $S = 10^{-6}$ м², энергия лазерного излучения, падающая на поверхность структуры за время одного импульса (без ослабляющих фильтров), $2.2 \cdot 10^{-6}$ Дж, длительность импульса 10^{-8} с, частота 10 Гц. Напряжение V_{00} , В: $a - 1000$, $b - 1200$.

структуре напряжения (рис. 2). При этом, как показано в [2], за время между двумя последовательными импульсами газового разряда уменьшается величина критического поляризационного заряда на границе газового слоя, изменение напряженности электрического поля в кристалле и изменение величины фотоотклика структуры. Как видно из рис. 2, b , при приложенном напряжении ($V_{00} = 1200$ эВ) детектор не поляризуется и позволяет одновременно измерять как форму и интенсивность импульсов излучения, так и энергию излучения в импульсе по числу импульсов фотоответа между двумя последовательными импульсами газового разряда (при известной энергии падающего на поверхность структуры излучения за время между этими разрядными импульсами).

Другой путь создания неполяризующихся детекторов заключается в увеличении площади освещаемой поверхности детектора. Экспериментально обнаружено, что пробой газового слоя структуры происходит на участке его поверхности площадью $S_0 < 10^{-6}$ м², независимо от размеров освещаемой площади детектора. Каждый последующий пробой происходит на новом участке поверхности этого слоя. Изменение напряженности электрического поля в кристалле в процессе регистрации излучения имеет место только на этом пробиваемом участке поверхности структуры (S_0). Именно из-за

изменения напряженности электрического поля на этом участке кристалла наблюдается изменение амплитуды цуга последовательных импульсов фотоответа при облучении поверхности структуры фотоимпульса одинаковой амплитуды. Если освещаемая площадь поверхности детектора значительно (на порядок) превосходит площадь S_0 , то вклад в фотоответ структуры от этого участка освещаемой поверхности (S_0) будет незначителен и цуг импульсов фотоответа между двумя последовательными импульсами газового разряда будет иметь одинаковую амплитуду. Как видно из рис. 3, при увеличении площади освещаемой поверхности структуры импульсы фотоотклика выравниваются по амплитуде. Детектор практически не поляризуется при освещаемой площадке на его поверхности $S > 1.5 \cdot 10^{-5}$ м². Такого типа приборы могут быть реализованы на кристаллах с малым значением

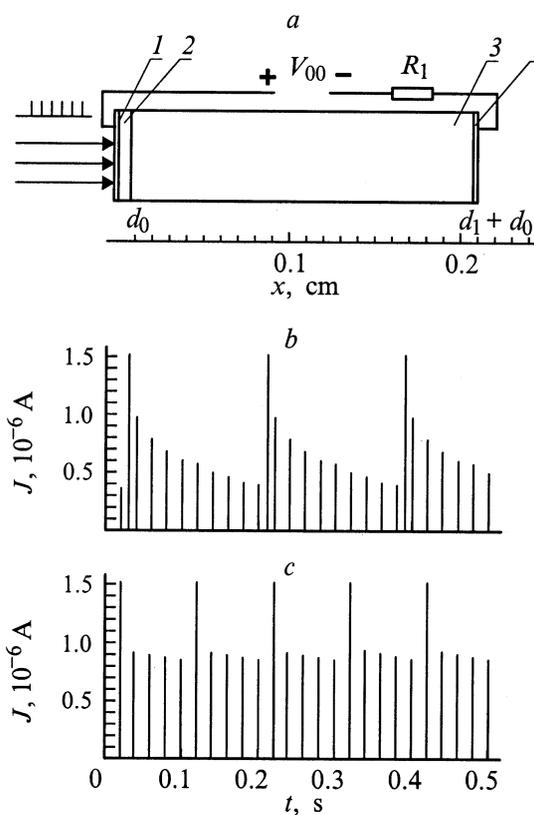


Рис. 3. Фотоответ алмазного дозиметра на М(ГД)ПМ структуре на изолирующем кристалле силиката висмута при импульсном освещении различных по площади участков ее поверхности (длина волны $\lambda = 0.54 \cdot 10^{-6}$ м, частота импульсов 50 Гц, $V_{00} = 1500$ В). a — схема эксперимента: 1 — оптически прозрачные электроды, 2 — слой газового диэлектрика толщиной $d_0 = 60 \cdot 10^{-6}$ м, 3 — кристалл силиката висмута ($\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$) толщиной $d_1 = 2 \cdot 10^{-3}$ м, R_1 — нагрузочное сопротивление. b, c — фотоответ М(ГД)П структуры при освещении на ее поверхности площади газового слоя $S = 3 \cdot 10^{-7}$ м² (b) и $S = 1.25 \cdot 10^{-5}$ м² (c); высокие редкие импульсы — импульсы тока (J) газового разряда; импульсы малой амплитуды с частотой следования 50 Гц — импульсы фотоответа (J) от световых импульсов.

параметра $\mu\tau$, $\mu\tau < 10^{-6} \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1}$, где μ — подвижность носителей, τ — время их жизни. Высокая чувствительность приборов на таких кристаллах к регистрируемому излучению определяется высокой напряженностью электрического поля в кристалле, $10^5 \div 10^6 \text{ В/м}$ [2].

Таким образом, показана возможность создания нового типа приборов на широкозонных изолирующих кристаллах: неполяризуемых детекторов–дозиметров излучений, позволяющих измерять одновременно как форму и интенсивность импульсного излучения, так и энергию излучения в импульсе.

Работа поддержана Международным научно-техническим центром (проект 447).

Список литературы

- [1] П.Г. Кашерининов, А.Н. Лодыгин. Письма ЖЭТФ, **23**(4), 23 (1997).
- [2] П.Г. Кашерининов, А.Н. Лодыгин. Письма ЖЭТФ, **24**(22), 64 (1998).
- [3] Н.П. Богородицкий, В.В. Пасынков. Материалы в радиоэлектронике (М., Госэнергоиздат, 1961).
- [4] И.А. Зеленин, П.Г. Кашерининов, В.Е. Харциев. Письма ЖЭТФ, **22**(5), 86 (1996).

Редактор Л.В. Шаронова

Non-polarizing detectors–dosimeters of radiation on wide-band insulating semiconductor crystals

P.G. Kasherininov, A.N. Lodygin, S.S. Martynov*,
V.S. Khrunov*

A.F. Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

* Institute for Physicotechnical Problems,
Dubna, Russia