

Влияние перегрева $p-n$ -перехода на деградацию мощных импульсных кремниевых лавинно-пролетных диодов

© А.Е. Беляев⁺, В.В. Басанец^{*}, Н.С. Болтовец^{*}, А.В. Зоренко^{*}, Л.М. Капитанчук[‡], В.П. Кладько⁺, Р.В. Конакова[†], Н.В. Колесник^{*}, Т.В. Коростинская^{*}, Т.В. Крицкая^{*}, Я.Я. Кудрик⁺, А.В. Кучук⁺, В.В. Миленин⁺, А.Б. Атаубаева⁺

⁺ Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарёва Национальной академии наук Украины, 03028 Киев, Украина

^{*} Государственное предприятие «Научно-исследовательский институт „Орион“», 03057 Киев, Украина

[‡] Институт электросварки им. Е.О. Патона Национальной академии наук Украины, 03680 Киев, Украина

(Получена 14 июля 2010 г. Принята к печати 14 июля 2010 г.)

Приведена оценка тепловых ограничений в импульсном режиме работы двухдрейфового лавинно-пролетного диода 8-миллиметрового диапазона длин волн с мощностью генерации до 30–35 Вт. Показано, что при длительности рабочего импульса 300 нс и амплитуде тока питания 11.3–15 А перегрев $p-n$ -перехода относительно окружающей среды составляет 270–430 °С. Определена граничная температура перегрева перехода, равная 350 °С, выше которой лавинно-пролетные диоды интенсивно деградируют. Приведены результаты рентгенофазового анализа и профили распределения компонентов в омических контактах Au–Pt–Ti–Pd–Si, подтверждающие тепловые ограничения в импульсном режиме работы лавинно-пролетного диода.

1. Введение

Импульсные кремниевые лавинно-пролетные диоды (ЛПД) находят широкое применение в различных системах радиолокации, навигации, управления, других радиоэлектронных устройствах специального назначения [1–6]. Важным фактором для использования мощных импульсных ЛПД в СВЧ схемах является учет особенностей теплового режима диода [2,4,7]. Для того чтобы избежать перегрева диода в импульсном режиме, необходимо иметь длительность импульса входной мощности меньше времени тепловой релаксации мезоструктуры, установленной на интегральном теплоотводе [2,4].

Оценки температурного перегрева мощных кремниевых ЛПД 8-миллиметрового диапазона длин волн с двухдрейфовой $p^+-p-n-n^+$ -структурой и рабочей площадью $2 \cdot 10^{-4}$ см², приведенные в [4,8] для плотности тока питания 20 кА/см², показали, что при длительности импульса 300–400 нс перегрев составляет 250–300 °С. В то же время давно установлено, что зависимость среднего времени наработки на отказ (D) от температуры (T) $p-n$ -перехода ЛПД определяется как $\lg D = 10 - T/40$ К [9]. Зависимость указывает на то, что с увеличением температуры $p-n$ -перехода на каждые 40 К долговечность ЛПД уменьшается на порядок.

Поскольку для ряда практических задач требуются мощные импульсные ЛПД миллиметрового диапазона длин волн с выходной СВЧ мощностью, превышающей 20 Вт, и плотностью токов до 40 кА/см², выяснение условий их перегрева в зависимости от длительности импульса представляется актуальным. Весьма существенным при этом является также исследование

физико-химических процессов, возникающих в омических контактах, и их устойчивости к тепловым перегревам, так как во многом именно они определяют катастрофические отказы ЛПД в изделиях. Поэтому цель работы заключалась в проведении оценки температуры перегрева мощного кремниевых двухдрейфового импульсного ЛПД миллиметрового диапазона длин волн и исследовании влияния температуры перегрева на межфазные взаимодействия в омических контактах Au–Pt–Ti–Pd–Si, в которых слои Pt и Ti являются диффузионными барьерами.

2. Образцы и методы их исследования

Исследовались образцы двух типов: тестовые структуры и ЛПД, изготовленные на тонких эпитаксиальных структурах. Тестовые структуры Au–Pt–Ti–Pd–(p^+)–Si были сформированы методом термического (Pd) и магнетронного (Ti–Pd–Au) распыления металлов на термически очищенную поверхность (p^+)–Si (далее Si) при температуре подложки 300 °С. На таких структурах до и после быстрой термической обработки (БТО) в течение 60 с при температуре 450 °С, термообработки (ТО) в вакууме при 350(450) °С в течение 10 мин, имитирующих режимы перегрева ЛПД, измерялись профили распределения компонентов слоев металлизации методом электронной оже-спектроскопии, фазовый состав и морфология поверхности пленки Au — методом рентгеновской дифракции (РД) и электронной микроскопии соответственно.

Лавинно-пролетные диоды 8-миллиметрового диапазона длин волн, как и тестовые структуры, были изготовлены на основе эпитаксиальных $p-n-n^+$ -

[†] E-mail: konakova@isp.kiev.ua

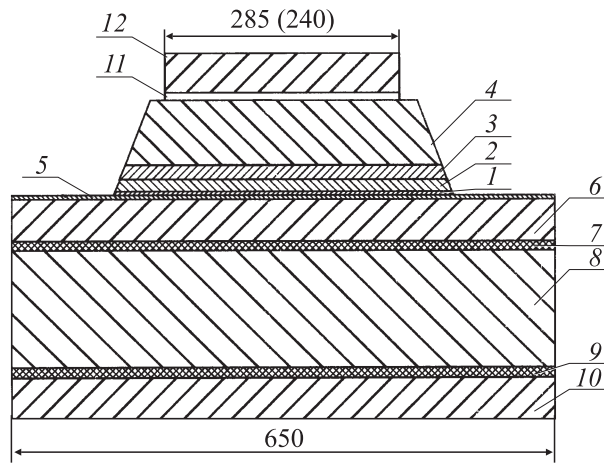


Рис. 1. Структура чипа кремниевого ЛПД (ИМРАТТ-диода): 1 — p^+ -область; 2, 3 — дрейфовые p - и n -области соответственно; 4 — n^+ -подложка; 5 — напыленная контактная система Pd–Ti–Pt–Au к p^+ -области; 6, 10, 11 — гальванические слои золота; 7, 9 — барьерные слои никеля; 8 — медный теплоотвод; 12 — напыленная контактная система к n^+ -области. Указаны диаметры в мкм.

структур с удельным сопротивлением n^+ -подложки 0.002–0.003 Ом · см [8]. Слой p^+ -Si изготавливался диффузией бора. Концентрация бора в p^+ -слое составляла $\sim 2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$, толщина p^+ слоя была ~ 0.3 мкм. Толщины эпитаксиальных p - и n -слоев были 0.95 и 1.15 мкм соответственно, а концентрации акцепторной и донорной примесей в них были одинаковыми и составляли $3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Омические контакты к p^+ - и n^+ -слоям кремния создавались нанесением слоев Au–Pt–Ti–Pd. Диоды изготавливались с интегральным теплоотводом. Структура диодного чипа представлена на рис. 1.

На корпусированных ЛПД в импульсном режиме были измерены следующие параметры: частота и выходная мощность при длительности СВЧ импульса 300 нс (по уровню 0.5).

Оценка перегрева мощного кремниевого импульсного ЛПД и предельно допустимых значений длительности импульса рабочего тока проводились с помощью тепловой модели [10–12].

3. Методические аспекты оценки тепловых ограничений импульсного режима лавинно-пролетного диода

На рис. 2 представлена схема полупроводниковой мезаструктуры ЛПД на медном теплоотводе. На этой схеме область I состоит из кремниевой n^+ -подложки и эпитаксиального n -слоя. Область II представляет собой кремниевые p - и p^+ -слои, область III — медный теплоотвод. Тепловые потери в контактных омических металлических слоях не учитывались.

Предполагается, что тепловая мощность P выделяется в бесконечно тонком слое в области $p-n$ -перехода. При длительности импульса $t_i \leq (2-3)\tau_{r1}$, где $\tau_{r1} = l_1^2/4\chi_1$ — время тепловой релаксации области I, $l_1 = 10$ мкм — толщина области I, χ_1 — коэффициент температуропроводности материала области I (кремний), тепловые потоки распространяются в области I и II в соответствии с величинами градиентов температуры в этих областях. Из области II тепловой поток уходит в теплоотвод III. В области I в течение длительности импульса тока t_i происходит накопление тепла, а в паузе между импульсами t_p тепло из области I переходит в теплоотвод III. Одновременно с указанными тепловыми процессами имеет место нагрев диода средней мощностью питания $P_{av} = P_i/Q$ на величину $\Delta T_{av} = R_{TO}P_{av}$, где R_{TO} — тепловое сопротивление диода в стационарном режиме; Q — скважность; P_i — импульсная мощность. Таким образом, температура активного слоя диода за время t_i повышается на величину

$$\Delta T = \Delta T_i + \Delta T_{av}, \quad (1)$$

где $\Delta T_i = R_i P$ — переменная составляющая полного разогрева диода, $P = P_i - P_i/Q = P_i(Q - 1)/Q$ — переменная составляющая импульсной мощности.

Уравнение (1) можно представить в виде

$$\Delta T = P_i R_T = P_i \left(R_{Ti} \frac{Q-1}{Q} + \frac{R_{TO}}{Q} \right). \quad (2)$$

Из (2) следует, что полное переходное тепловое сопротивление ЛПД равно

$$R_T = R_{Ti} \frac{Q-1}{Q} + \frac{R_{TO}}{Q} = R_i + R_{av}, \quad (3)$$

где $R_{Ti} = R_{T1}R_{T2}/(R_{T1} + R_{T2})$, R_i — тепловое сопротивление для переменной составляющей импульсной мощности, R_{av} — тепловое сопротивление для постоянной составляющей импульсной мощности, R_{T1} — тепловое сопротивление для переменной составляющей импульсной мощности P_{\sim} , создаваемой со стороны области I, R_{T2} — тепловое сопротивление для P_{\sim} , создаваемое со стороны областей II и III.

Рассмотрим методики расчета составляющих уравнения (3). При выполнении условия $t_i \leq (2-3)\tau_{r1}$ для

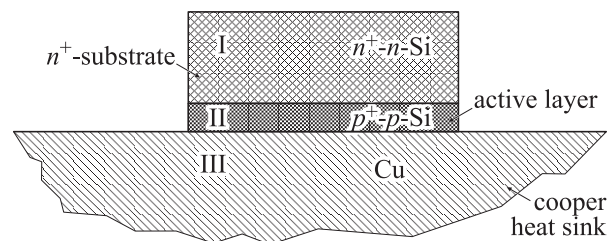


Рис. 2. Схема мезаструктуры кремниевого ЛПД на медном теплоотводе, принятая для тепловых расчетов.

сечения $X = 0$, в котором температура нагрева диода максимальна, R_{T1} имеет следующий вид [12]:

$$R_{T1} = \frac{2}{\lambda_1} \sqrt{\frac{\chi_1 t_i}{\pi}} / S, \quad (4)$$

где S — площадь мезаструктуры диода, λ_1 — коэффициент теплопроводности материала области I (кремний), χ_1 — температуропроводность кремния.

Для рассматриваемых в данной работе ЛПД уровень легирования активного слоя достаточно высок. Концентрации акцепторов в p -слое и доноров в n -слое примерно одинаковы и составляют $\sim 3.0 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Поэтому можно полагать, что значения коэффициента теплопроводности λ и температуропроводности χ для активного слоя и n^+ -, p^+ -слоев приблизительно одинаковы. В соответствии с [13] будем полагать, что $\lambda_1 = \lambda_2 \approx 0.8 \text{ Вт/см}\cdot\text{град}$, $\chi_1 \approx \chi_2 \approx 0.5 \text{ см}^2/\text{с}$.

Величина R_{T2} определяется нестационарными тепловыми процессами в областях II, R'_{T2} , и III, R'_{T3} , и может быть представлена в виде

$$R_{T2} = R'_{T2} + R'_{T3}, \quad (5)$$

где R'_{T2} и R'_{T3} определены для переменных потоков мощности.

Величина R'_{T2} может быть найдена для стационарного режима при непрерывном потоке мощности как

$$R'_{T2} = \frac{l_2}{\lambda_2 S}, \quad (6)$$

где χ_2 — коэффициент теплопроводности материала области II (кремний).

Следует отметить, что расчет R'_{T2} по (6) дает несколько завышенную величину теплового сопротивления по сравнению с тепловым сопротивлением области II в нестационарном тепловом режиме. Однако при $t_i \gg \tau_{r2}$, где $\tau_{r2} = l_2^2/4\chi_2$ — время тепловой релаксации слоя II толщиной l_2 , использование соотношения (6) для расчета R'_{T2} можно считать допустимым. Для рассматриваемых в данной работе конструкций импульсных ЛПД $l_2 \leq 1.5 \text{ мкм}$. Таким образом, $\tau_{r2} \leq 10 \text{ нс}$, что намного меньше типичных длительностей рабочих импульсов тока $t_i \approx 50\text{--}300 \text{ нс}$ импульсных ЛПД миллиметрового диапазона.

В соответствии с [11] R'_{T3} определяется в виде

$$R'_{T3} = \frac{(\chi_3 t_i)^{1/2}}{S \lambda_3} \left[\frac{2}{\sqrt{\pi}} - 2 \left\{ \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-R^2/4\chi_3 t_i} - \frac{r}{2(\chi_3 t_i)^{1/2}} \operatorname{erfc} \frac{r}{2(\chi_3 t_i)^{1/2}} \right\} \right], \quad (7)$$

где r — радиус мезаструктуры диода, χ_3 — коэффициент температуропроводности материала теплоотвода (меди).

Очевидно, что при $t_i < \tau_{r3}$, где $\tau_{r3} = r^2/4\chi_3$ — время тепловой релаксации тепла в теплоотвод, расчет составляющих R_T в уравнении (3) может быть выполнен в

рамках одномерного рассмотрения тепловых процессов в диоде. При этом уравнение (7) значительно упрощается:

$$R'_{T3} = \frac{2}{\lambda_3} \sqrt{\frac{\chi_3 t_i}{\pi}} / S, \quad (8)$$

где $t = t_i - \tau_{r2}$.

Для ЛПД в соответствии с [1] уравнение для теплового сопротивления диода в стационарном режиме имеет вид

$$R_{T0} = \left(\frac{l_2}{\lambda_2} + \frac{r}{\lambda_3} \right) / S. \quad (9)$$

Таким образом, при больших Q , когда $R_{av} = R_{T0}/Q \ll R_{Ti}$, и при выполнении условия $t_i < \tau_{r3}$ удобно использовать в расчетах удельное тепловое сопротивление $\rho_T = R_T S$.

Рассмотрим ограничения принятой модели при уменьшении скважности Q и неизменной длительности импульса t_i . Очевидно, что при уменьшении $t_p - t_i$ поток тепла из области I не успевает уйти в теплоотвод III. Так как для рассмотренных в данной работе импульсных ЛПД $\tau_{r1} \gg \tau_{r2}$, можно полагать, что расчеты по формуле (3) допустимы при $(t_p - t_i) \geq 3\tau_{r1}$ или при $Q \geq 3\tau_{r1}/t_i + 1$.

4. Результаты оценок удельного теплового сопротивления и превышения температуры p - n -перехода

Оценка удельного теплового сопротивления ρ_T проведена для импульсного ЛПД на медном теплоотводе (коэффициент теплопроводности меди $\lambda_3 = 3.9 \text{ Вт/см}\cdot\text{град}$ с диаметром мезаструктуры 240 мкм и толщиной n^+ -подложки 10 мкм . Для таких диодов $\tau_{r1} \approx 500 \text{ нс}$, $\tau_{r2} \leq 10 \text{ нс}$. Поэтому в соответствии с условиями $t_i \leq (2\text{--}3)\tau_{r1}$ и $t_i \gg \tau_{r2}$ уравнение (3) справедливо для $50 \leq t_i \leq 500 \text{ нс}$ при скважности $Q \geq 30$.

Зависимости $\rho_T = f(t_i)$, рассчитанные по формуле (3), приведены на рис. 3. Для сравнения там же приведены расчетные значения превышения температуры p - n -перехода над температурой окружающей среды (ΔT) при токах питания $11.3, 15, 18 \text{ А}$. Из рис. 3 видно, что при длительности импульса рабочего тока 250 нс и амплитуде $11.3\text{--}15 \text{ А}$ перегрев p - n -перехода составляет $270\text{--}430^\circ\text{C}$. Поскольку диод должен также надежно работать при повышении температуры окружающей среды (60°C), то суммарная температура на p - n -переходе при таких условиях эксплуатации может достигать $310\text{--}490^\circ\text{C}$.

Для кремниевых импульсных ЛПД обычно рекомендуется предельная температура p - n -перехода не выше 250°C при температуре генератора 50°C [14]. Предельная температура определяется с целью исключить катастрофическую деградацию мезаструктуры за счет процессов термоэлектродиффузии на границе раздела кремний-контактообразующий слой.

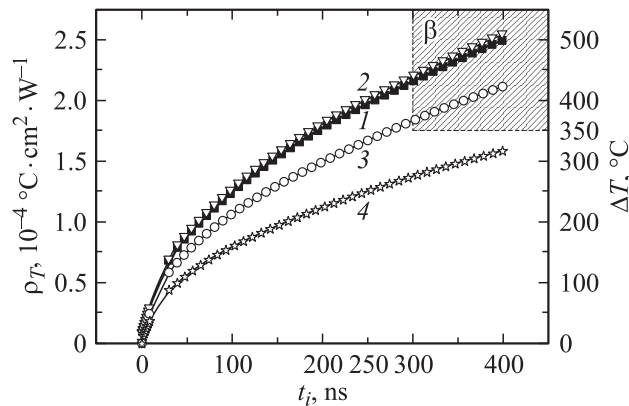


Рис. 3. Зависимости от длительности импульса расчетного удельного теплового сопротивления диода ρ_T (1) и превышения температуры на $p-n$ -переходе над окружающей средой (ΔT) при значениях амплитуды импульсы рабочего тока ЛПД 18 (2), 15 (3) и 11.3 А (4). Диаметр мезаструктуры 240 мкм. β — область деградации диода.

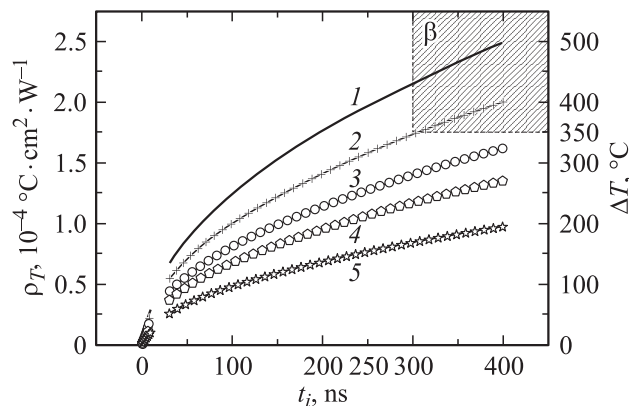


Рис. 4. Зависимости от длительности импульса расчетного удельного теплового сопротивления диода (ρ_T) (1) и превышения температуры на $p-n$ -переходе над окружающей средой (ΔT) при значениях амплитуды импульсы рабочего тока ЛПД 22 (2), 18 (3), 15 (4) и 11.3 А (5). Диаметр мезаструктуры 280 мкм. β — область деградации диода.

В случае необходимости обеспечения сравнительно небольших сроков службы диода (до 500 ч) может быть допустимой более высокая температура перегрева $p-n$ -перехода мезаструктуры. Однако в этом случае предельная температура может ограничиваться межфазными взаимодействиями на границе раздела кремний—контактные слои. Например, в случае проникновения Au сквозь диффузионные барьеры (буферные слои) на границу раздела контактообразующего металла с Si возможно образование эвтектики AuSi (температура эвтектики $\sim 370^\circ\text{C}$ [15]). Возможно также ограничение по температуре теплового пробоя кремниевой мезаструктуры (360–400 $^\circ\text{C}$). С учетом этого можно определить условную границу недопустимого превышения температуры в области $p-n$ -перехода: $\sim 350^\circ\text{C}$.

Из ограничений по предельно допустимой температуре вытекает требование к допустимым значениям амплитуды и длительности импульса рабочего тока для заданных размеров мезаструктуры кремниевого диода. Из рис. 3 следует, что такие диоды не рекомендуется использовать при амплитуде рабочего тока выше 15 А и длительности СВЧ импульса 300 нс. При увеличении диаметра мезаструктуры до 285 мкм допустимые значения амплитуды импульса рабочего тока при заданной длительности импульса (300 нс) могут быть увеличены до 22 А (рис. 4).

Были изготовлены и исследованы экспериментальные партии двухдрейфовых кремниевых ЛПД с диаметрами мезаструктур 240 и 285 мкм. Как показал опыт настройки СВЧ генераторов с ЛПД, имеющими диаметр мезаструктуры 240 мкм, при амплитуде импульсов рабочих токов 11–15 А и длительности импульса 300 нс диоды обеспечивают в нормальных климатических условиях генерацию импульсной СВЧ мощности ≥ 20 Вт на частоте 33.75 ГГц и минимальный срок наработки не менее 1000 ч. При диаметре мезаструктуры 285 мкм и длительности импульса рабочего тока 300 нс амплитуды импульсов рабочих токов диода могут быть в диапазоне 15–22 А и обеспечивать выходную импульсную СВЧ мощность 30–35 Вт в частотном диапазоне 32.5–34.5 ГГц, что превышает уровень, достигнутый ведущими зарубежными фирмами [14,16].

5. Межфазные взаимодействия в контактных металлических слоях, обусловленные превышением температуры

Для исследования физико-химических процессов в контактных металлических слоях тестовые структуры подвергались БТО в течение 60 с при 350(450) $^\circ\text{C}$ и ТО при этих же температурах в течение 10 мин в вакууме. Оказалось, что БТО практически не повлияла на профили распределения компонентов в слоях металлизации. Однако 10-минутные ТО при 350 $^\circ\text{C}$ привели к небольшой перестройке в металлических слоях и кардинальным изменениям после ТО при 450 $^\circ\text{C}$.

На рис. 5, а–с приведены профили распределения компонентов в тестовых структурах Au–Pt–Ti–Pd–Si — исходной и прошедшей ТО при 350(450) $^\circ\text{C}$ в вакууме. Видно, что в контактном покрытии исходного образца и термообработанного при 350 $^\circ\text{C}$ в течение 10 мин сохраняется многослойная структура. Однако распределение Si немонотонно по толщине и в исходном образце, и после ТО при 350 $^\circ\text{C}$ в течение 10 мин, что может указывать на возможность фазообразования кремния с палладием уже в процессе напыления Pd [17,18]. При этом максимальное содержание кислорода и углерода локализовано в пленке титана и некоторое их количество отмечается в переходных слоях на границах раздела Pt–Ti и Pd–Ti.

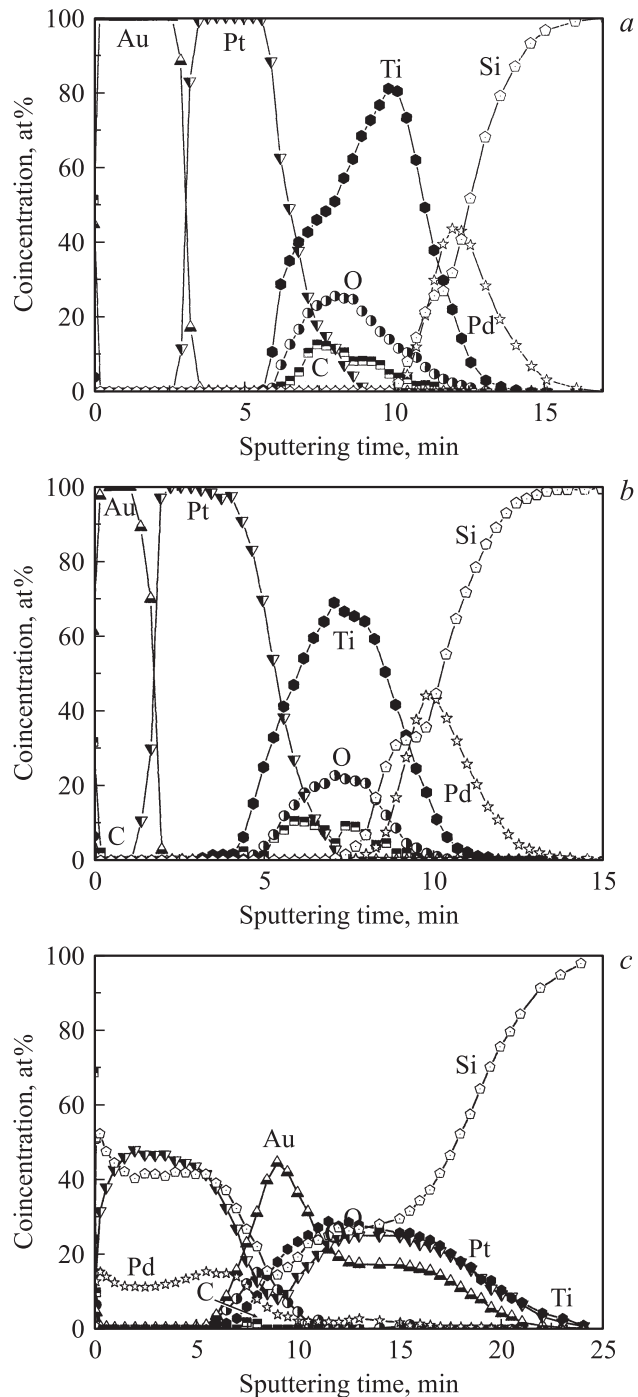


Рис. 5. Профили распределения компонентов в контактном покрытии Au–Pt–Ti–Pd–Si в исходном образце (a), после ТО в течение 10 мин при 350 (b) и 450°C (c).

ТО не повлияла также на состояние верхнего слоя металлизации (Au), что нашло свое подтверждение в отсутствии морфологических изменений на поверхности пленки Au (рис. 6), хотя Pt продиффундировала примерно на половину толщины пленки золота.

Фазовый состав контактного покрытия Au–Pt–Ti–Pd–Si исследовался (*ex situ*) методом

рентгеновской дифракции на рентгеновском дифрактометре Philips X'Pert-MPD ($\text{CuK}\alpha$, длина волны $\lambda = 0.15418$ нм) в геометрии Брэгга–Брентано.

В спектрах РД исходного контакта Au–Pt–Ti–Pd–Si (рис. 7) наблюдаются рефлексы от подложки Si(111) при 28.493°, от Pd_2Si , а также семейство рефлексов от металлических слоев Au, Pt, Ti, Pd, что свидетельствует о их поликристаллической структуре. Фаза Pd_2Si , по-видимому, образовалась в результате взаимодействия Pd с Si в процессе напыления на подогретую до 300°C подложку. Наличие поликристаллического Pd указывает на незавершенность процесса фазообразования Pd_2Si в исходном образце. В отожженном при 350°C в течение 10 мин образце (рис. 7) по сравнению с исходным спектром РД наблюдается рефлекс, соответствующий фазе Pd_3Ti .

Температурная обработка при 450°C в течение 10 мин приводит к нарушению слоевой структуры контактного покрытия, возникновению протяженной области перемешивания, выходу Si, Pt и Pd сквозь пленки Au на внешнюю поверхность металлизации, проникновению Pt, Ti и Au в Si, значительному уменьшению содержания углерода внутри области перемешивания, смещению кислорода к внешней поверхности и значи-

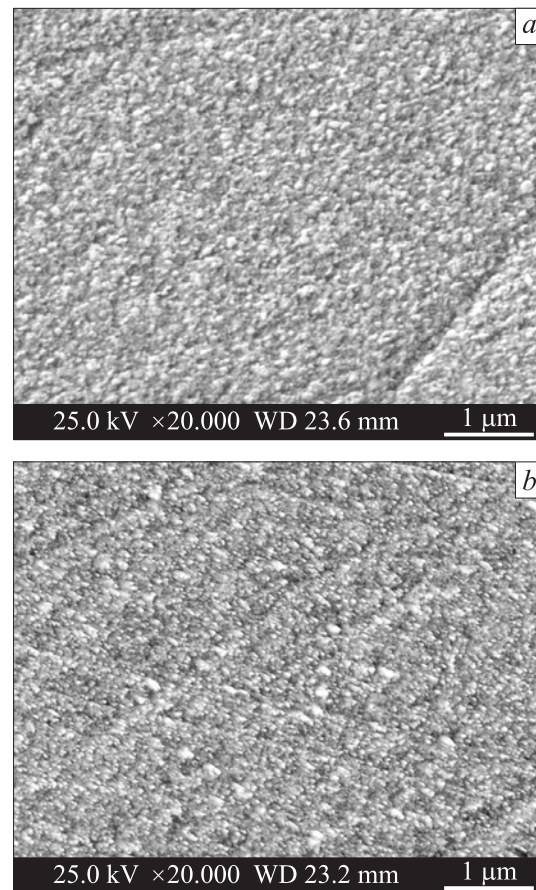


Рис. 6. Морфология поверхности пленки Au исходного образца (a) и после ТО при 350°C в течение 10 мин (b).

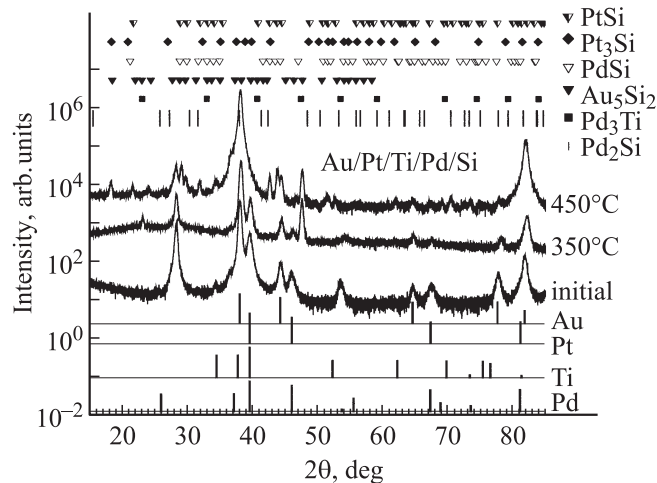


Рис. 7. Рентгенодифрактограммы структур Au–Pt–Ti–Pd–Si: исходной, после ТО при 350°C в течение 10 мин и после ТО при 450°C в течение 10 мин.

тельному перемещению профиля распределения Au в глубь области перемешивания (рис. 5, *c*). Вид профилей распределения металлических компонентов и кремния, наличие характерных полочек в этих распределениях указывают на возможность формирования ряда фаз, в том числе силицидных, что коррелирует с данными рентгенофазового анализа. На рентгенодифрактограммах этого образца (рис. 7, кривая 3) наблюдаются фазы PtSi, PdSi, Pt₃Si, Au₅Si₂. Кроме того, наблюдается еще два сильных максимума при 39 и 82°, вблизи рефлексов объемного кубического Au, что свидетельствует об образовании твердого раствора на основе Au, в состав которого, по-видимому, входят Au, Pt, Ti, Pd и Si. Анализ спектра РД этого образца свидетельствует о том, что в процессе ТО при 450°C в течение 10 мин происходит, вероятнее всего, полная взаимодиффузия компонентов по границам зерен поликристаллических пленок с образованием твердого раствора. Фактором, ускоряющим массоперенос при ТО, является также наличие пор, возникающих вследствие стимулированной термообработкой релаксации внутренних механических напряжений в слоях контактной металлизации. На рис. 8 показаны фрагменты морфологии поверхности тестовой структуры Au–Pt–Ti–Pd–Si, прошедшей ТО при 450°C в течение 10 мин. Видно, что поверхность пленки Au покрыта порами (рис. 8, *a, b*), размеры которых лежат в пределах 0.1–1 мкм.

На отдельных участках таких тестовых структур на поверхности пленки наблюдаются дефекты, природа которых, по-видимому, связана с релаксацией внутренних механических напряжений в области концентраторов напряжений (рис. 8, *c*), в роли которых могут выступать фазовые включения.

Таким образом, результаты структурных исследований и электронной оже-спектроскопии показывают, что термообработка при 350(450)°C в течение 10 мин даже

без имитации электрической нагрузки приводит к фазообразованию в контактном покрытии Au–Pt–Ti–Pd–Si при 350°C и полному нарушению слоевой структуры после ТО при 450°C, что подтверждает сделанные выше оценки о роли превышения температуры на $p-n$ -переходе над окружающей средой в деградации ЛПД.

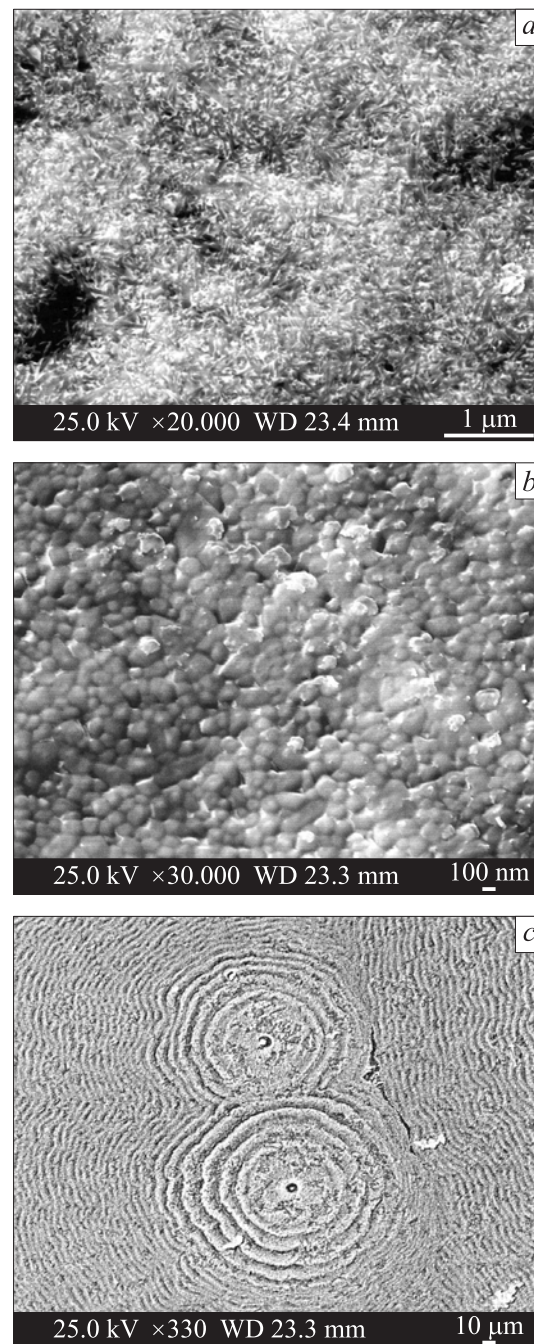


Рис. 8. Морфология поверхности пленки Au после ТО при 450°C в течение 10 мин: *a, b* — фрагменты поверхности с разным увеличением; *c* — фрагмент поверхности с релаксацией внутренних механических напряжений в области концентраторов напряжений.

6. Заключение

Таким образом, для мощных импульсных кремниевых двухпролетных ЛПД 8-миллиметрового диапазона длин волн определена граничная температура $p-n$ перехода, равная 350°C , выше которой ЛПД интенсивно деградируют. Исходя из этой температуры предложен импульсный режим работы ЛПД, обеспечивающий его долговременную работу.

Для повышения долговечности мощных импульсных ЛПД необходим поиск варианта контактной металлизации с диффузионными барьерами, не взаимодействующими с Si и соседними металлическими слоями до температуры, превышающих 350°C .

Список литературы

- [1] А.С. Тагер, В.М. Вальд-Перлов. *Лавинно-пролетные диоды в технике СВЧ* (М., Сов. радио, 1968) гл. 9 с. 374; гл. 7, с. 335.
- [2] А.К. Шухостанов. *Лавинно-пролетные диоды. Физика, технология, применение* (М., Радио и связь, 1997) гл. 7, с. 157.
- [3] Л.В. Касаткин, В.П. Рукин. Изв. вузов. Радиоэлектроника, **48** (6), 3 (2005).
- [4] Л.В. Касаткин, В.Е. Чайка. *Полупроводниковые устройства диапазона миллиметровых волн* (Севастополь, Вебер, 2006) гл. 1, с. 32; гл. 2, с. 132.
- [5] G. Haddad, R. Trew. IEEE Trans. MTT-S, **50** (3), 760 (2002).
- [6] H. Eisele, G. Haddad. IEEE Trans. MTT, **46** (6), 739 (1998).
- [7] В.Ф. Олейник, В.Л. Булгач, В.В. Валяев, А.В. Зоренко, Д.В. Миронов, В.Е. Чайка. *Электронные приборы миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов на основе нанотехнологии* (Киев, ГНИКТ, 2004).
- [8] В.В. Басанец, Н.С. Болтовец, А.В. Зоренко, А.В. Гуцул, Н.В. Колесник, С.И. Геращенко. Техника и приборы СВЧ, № 1, 27 (2009).
- [9] Н.С. Давыдова, Ю.З. Данюшевский. *Диодные генераторы и усилители СВЧ* (М., Радио и связь, 1986) гл. 5, с. 143.
- [10] А.С. Тагер. Электрон. техн. Сер. 1. Электроника СВЧ, **5**, 3 (1981).
- [11] G. Gibbons. Sol. St. Electron., **13** (6), 799 (1970).
- [12] Г. Карлслюу, Д. Егер. *Теплопроводность твердых тел* (М., ИЛ, 1964).
- [13] *Физические величины*. Справочник, под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова (М., Энергоатомиздат, 1991) с. 341.
- [14] <http://www.quinstar.com>
- [15] М. Хансен, К. Андерко. *Структуры двойных сплавов* (М., Металлургиздат, 1962) т. 1, с. 253.
- [16] <http://www.microsemi.com>
- [17] Ш. Мьюрарка. *Силициды для СБИС* (М., Мир, 1989) гл. 2, с. 59. [Пер. с англ.: S.P. Murarka. *Silicides for VLSI Application* (Academic Press, N.Y.-London, 1983)].
- [18] А.Е. Гершинский, А.В. Ржанов, Е.И. Черепов. Микроэлектроника, **11** (2), 86 (1982).

Редактор Л.В. Шаронова

Effect of $p-n$ junction overheating mode on degradation of silicon high-power pulse IMPATT diodes

A.E. Belyaev⁺, V.V. Basanets^{*}, N.S. Boltovets^{*}, A.V. Zorenko^{*}, L.M. Kapitanchuk[‡], V.P. Kladko⁺, R.V. Konakova⁺, N.V. Kolesnik^{*}, T.V. Korostinskaya^{*}, T.V. Kritskaya^{*}, Ya.Ya. Kudryk⁺, A.V. Kuchuk⁺, V.V. Milenin⁺, A.B. Ataubaeva⁺

⁺ V. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics, National Academy of Sciences of Ukraine, 03028 Kiev, Ukraine

^{*} State Enterprise Research Institute „Orion“, 03057 Kiev, Ukraine

[‡] E.O. Paton Electric Welding Institute, National Academy of Sciences of Ukraine, 03680 Kiev, Ukraine

Abstract We present estimations of thermal limitations for pulse operation mode of an 8 mm-wave double-drift impact avalanche and transit-time (IMPATT) diode with microwave power up to 30–35 W. It is shown that, at pulse duration of 300 ns and amplitude of 11.3–15 A, $p-n$ junction overheating is $270-430^{\circ}\text{C}$. The limiting value of $p-n$ junction temperature at which IMPATT diode degradation begins is found to be 350°C . The X-ray phase analysis data and concentration depth profiles of Au–Pt–Ti–Pd–Si ohmic contact components are given. They confirm our estimations of thermal limitations for pulse operation mode of an 8 mm-wave IMPATT diode.