

делением энергии по колебательным степеням свободы мы предполагаем дать в отдельной публикации.

В заключение выделим наиболее важные, с нашей точки зрения, моменты работы: обнаружен режим протекания эндотермической реакции, которая благодаря действию химического источника колебательно-возбужденных молекул формирует активную среду, способную к генерации и усилению возмущений; предложена новая физическая модель, описывающая осциллирующий режим неравновесной химической реакции за фронтом УВ.

### Список литературы

- [1] Griffith R. W., Sanderman R. J., Hornung H. G. // J. Phys. D. 1976. Vol. 9. N 12. P. 1681—1692.
- [2] Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика. 3-е изд., перераб. М.: Наука, 1986. 736 с.
- [3] Кузнецов Н. М. // ЖЭТФ. 1985. Т. 88. Вып. 2. С. 470—475.
- [4] Барышников А. С., Скворцов Г. Е. // ЖТФ. 1979. Т. 49. Вып. 11. С. 2483—2485.
- [5] Мишин Г. И., Бедин А. П., Ющенкова Н. И. и др. // ЖТФ. 1981. Т. 51. Вып. 11. С. 2315—2324.
- [6] Франк-Каменецкий Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.: Наука, 1967. 491 с.
- [7] Scott S. K. // Acc. Chem. Res. 1987. Vol. 20. P. 186—191.
- [8] Борисов А. А., Заслонко И. С., Когарко С. М. // Физика горения и взрыва. 1968. № 3. С. 387—393.
- [9] Заслонко И. С., Мукосеев Ю. К., Слинкин С. В. // Хим. физика. 1987. Т. 6. № 3. С. 299—303.
- [10] Заслонко И. С., Мукосеев Ю. К., Тюрин А. Н. // Хим. физика. 1988. Т. 7. С. 1459—1465.

Институт химической физики АН СССР  
Москва

Поступило в Редакцию  
21 апреля 1988 г.

## ДИНАМИКА РАЗВИТИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ БЕЗЭЛЕКТРОДНОГО РАЗРЯДА

Л. П. Грачев, И. И. Есаков, Г. И. Мишин, А. Б. Федотов

Одно из направлений неравновесной плазмохимии связано с использованием разряда, формируемого в фокусе сходящегося пучка электромагнитного (ЭМ) излучения [1]. В плазмохимии наибольший интерес представляют высокие давления газа. Однако реализация неравновесного разряда в этом случае затруднена из-за развития плазменных неустойчивостей [2]. Теоретическое рассмотрение типичных неустойчивостей СВЧ плазмы проведено в работах [3, 4]. В настоящей работе представлены результаты экспериментов по исследованию структуры разряда, формируемого в фокусе широкоугольного сходящегося пучка ЭМ волны диапазона 10 см. Прослеживается динамика его развития и приводятся результаты измерения уровня ионизации. По скорости распада плазмы определяется степень ее неравновесности. Экспериментальные данные сравниваются с выводами теории.

Исследования проводились на установке, основные элементы которой описаны в [5]. ЭМ излучение поступало на зеркало и фокусировалось, отразившись от его вогнутой поверхности. Амплитуда поля (в падающей на зеркало волне  $E_n = 5 \cdot 10^2$  В/см, а в фокусе  $E_f = 5 \times 10^3$  В/см) достаточна для пробоя воздуха при давлениях до 130 Тор. Длительность ЭМ импульса ( $t_n$ ) варьировалась от 4 до 40 мкс. Пауза между импульсами была не менее 1 мин.

Разряд фотографировался с двух направлений. Фиксировалась его проекция на плоскость, образованную волновым и электрическим векторами ( $E$ -плоскость), и на плоскость, перпендикулярную электрическому вектору ( $H$ -плоскость). Время экспозиции превышало время свечения разряда.

Плазма зондировалась непрерывным микроволновым излучением с длиной волны 1 см. Измерялось его затухание при распространении через плазму. Ось зондирования была перпендикулярна  $E$ -плоскости и проходила через ось волнового пучка. Размер области, занятой плазмой, вдоль оси определялся по фотографиям разряда. Поперечный размер зондируемой области 3 см.

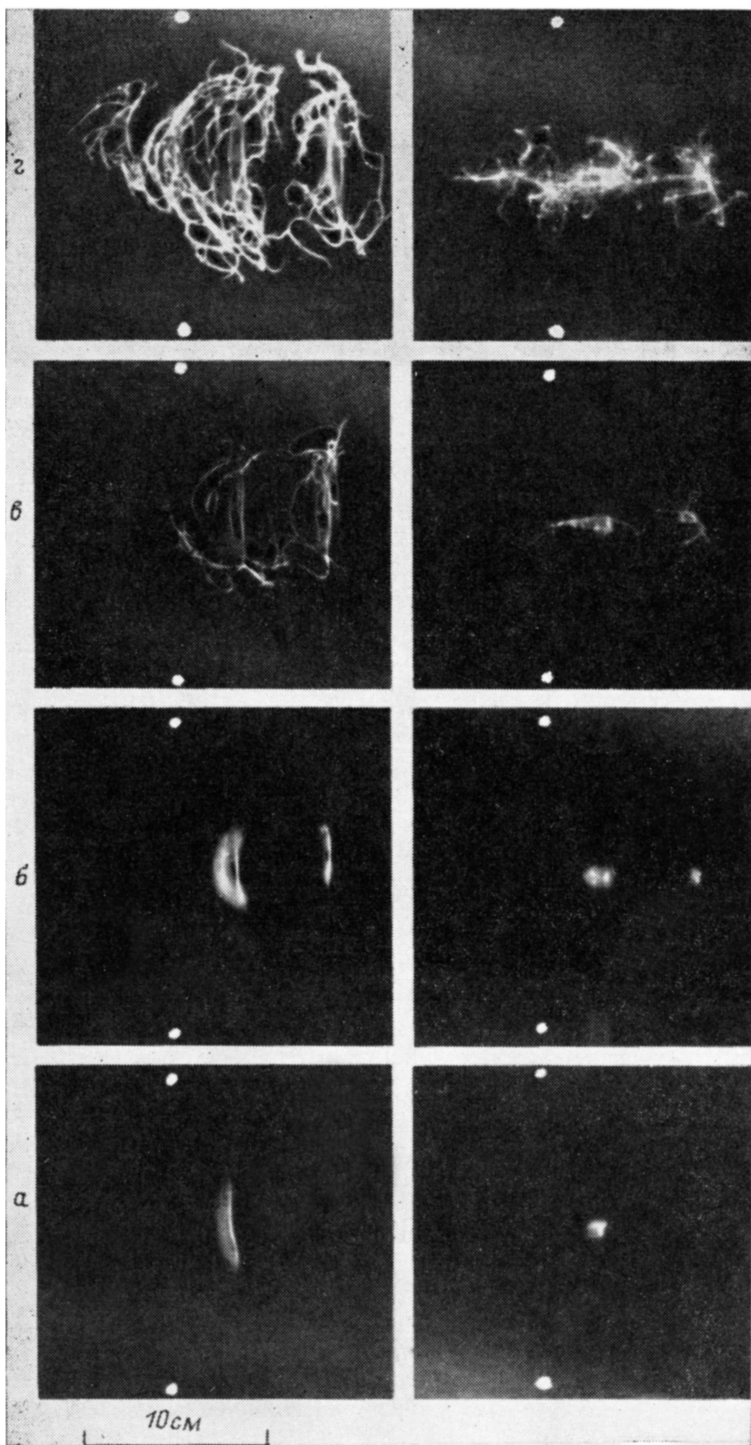


Рис. 1.

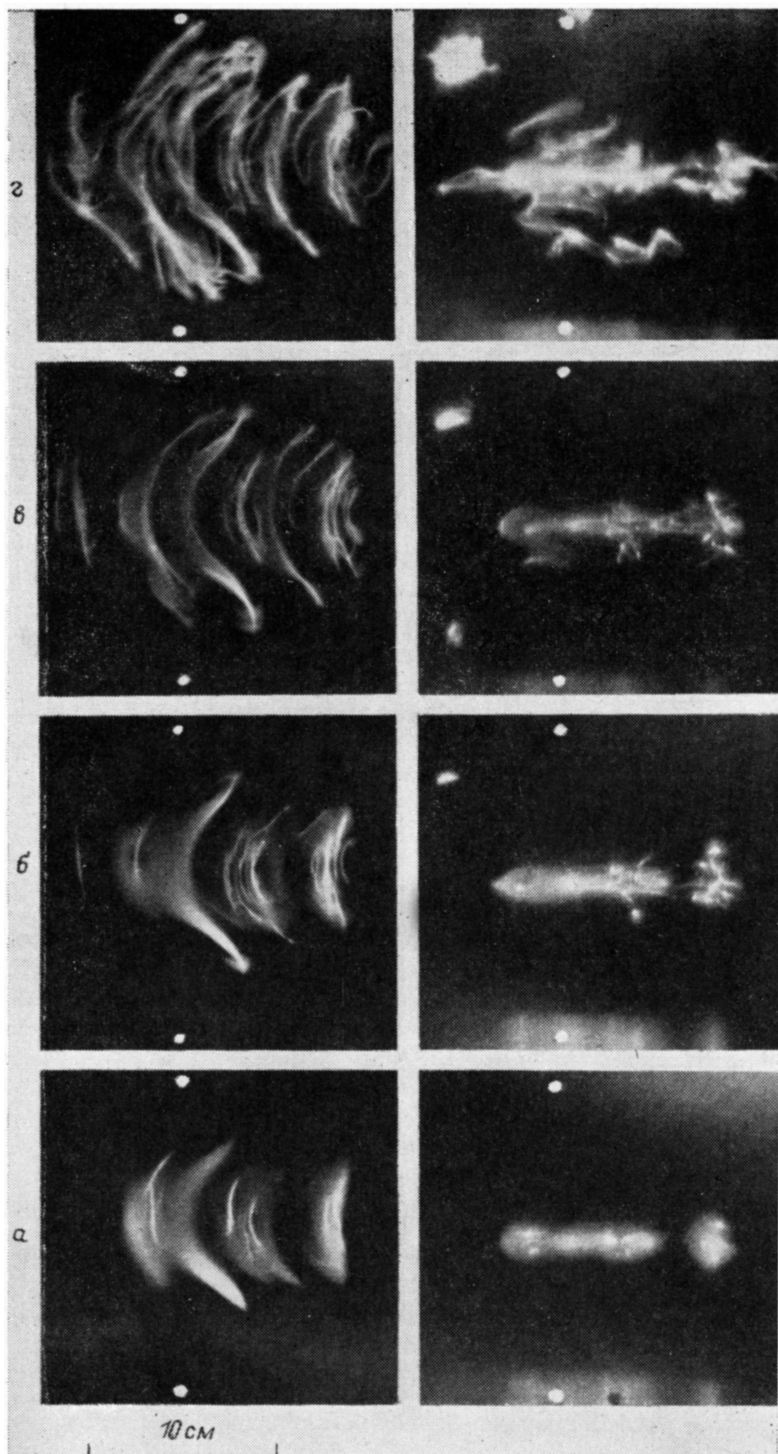


Рис. 2.

Таким образом, разряд изучался по набору его фотографий при различных  $P$  и  $t_n$  и соответствующих им осциллограммам зондирующего сигнала. На рис. 1, 2 в качестве примера даны фотографии разрядов при  $P=120$  и 50 Тор и  $t_n=4$  (а), 8 (б), 16 (в) и 40 мкс (г), а на рис. 3 при  $P=20$  Тор  $t_n=4$  мкс (при таком  $P$  с увеличением  $t_n$  вид разряда не меняется). Левые фотографии соответствуют проекции разряда на  $E$ -плоскость, правые — на  $H$ -плоскость. Направление потока фокусируемой ЭМ энергии слева направо. Точки указывают положение оси зондирования. На рис. 4 представлены осциллограммы зондирующего сигнала при  $P=120$  (а), 20 (б) и 12 Тор (в) и  $t_n=40$  мкс, а также наводка от СВЧ импульса (г). Нижняя прямая соответствует максимально возможному затуханию (1 — полное затухание, 2 — отсутствие затухания).

На основании анализа всей совокупности полученных результатов структура разряда и динамика ее развития в условиях эксперимента представляются следующими. Разряд существует в 4 формах: диффузный (рис. 3), диффузный с искровыми каналами (рис. 2,  $t_n=4$  мкс), искровой с диффузным ореолом (рис. 2,  $t_n=8$  и 16 мкс) и шнуровой (рис. 1,  $t_n=40$  мкс). Диффузная форма характерна для  $P < 25$  Тор и ранних стадий развития разряда более высокого  $P$ . Как следует из данных эксперимента, разряд заполняет область, где ЭМ

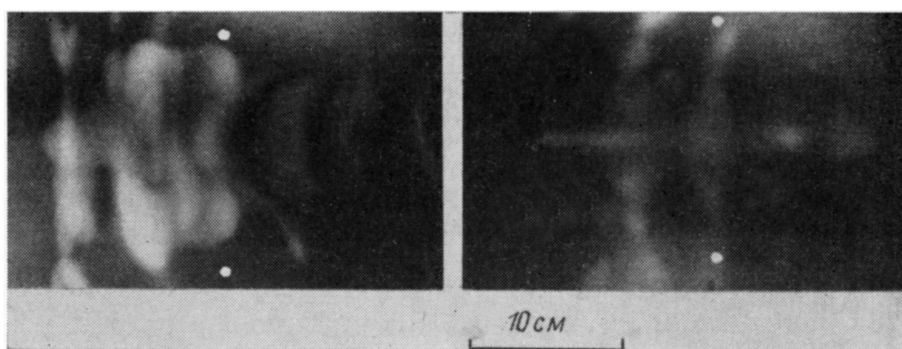


Рис. 3.

поле больше пробойного ( $E_{проб}$ ). Он разбит на страты, параллельные фронту ЭМ волны. Расстояние между ними  $\lambda/2$  ( $\lambda$  — длина волны). Стратификация, видимо, является следствием плазменной неустойчивости отраженной волны, характерный масштаб которой как раз и равен  $\lambda/2$ .

Рассмотрим осциллограмму на рис. 4 ( $P=20$  Тор), для которого типична диффузная форма. Затухание сигнала почти постоянно в течение импульса и соответствует средней по объему концентрации плазмы ( $n_e$ ) около  $4.5 \cdot 10^{11}$   $1/\text{см}^3$ . Если же оценить  $n_e$  из условия ионизационного баланса при известном отношении  $E_f$  к  $E_{проб}$ , то она должна быть на порядки больше.

Следовательно, развитие разряда, приведенного на рис. 3, возможно, происходит следующим образом. После пробоя газа за время, меньшее времени разрешения диагностической аппаратуры, фронт разряда из фокуса «убегает» в сторону зеркала и экранирует созданную плазму. Поддерживается она прямым излучением напряженностью  $E_n$ , лишь несколько меньшей  $E_{проб}$ . В этом случае темп распада плазмы в течение импульса будет незначительным, что и наблюдается на осциллограмме. После окончания СВЧ импульса  $n_e$  падает, отслеживая его задний фронт. Это в соответствии с [6] может означать, что плазма диффузного разряда является неравновесной. Время жизни такой плазмы, очевидно, определяется остыванием электронов в неупругих электрон-молекулярных столкновениях и последующей их рекомбинацией. При этом время распада, например, при  $P=20$  Тор составляет около 2 мкс.

При  $P < 13$  Тор амплитуда поля волны  $E_n$ , падающей на зеркало, становится больше амплитуды пробойного поля  $E_{проб}$ , определяемой из [5], и граница разряда начинает «убегать» в обе стороны от фокуса, увеличивая экранировку плазмы. Это, видимо, объясняет, почему при  $P < 13$  Тор начальная  $n_e$  уменьшается в течение импульса. На рис. 4 при  $P=12$  Тор приведена осциллограмма для этого случая.

Форма разряда, условно названная диффузной с искровыми каналами, существует на ранних стадиях развития разряда. Каналы вытянуты вдоль  $E$ . Они формируются в отдель-

ных структурах и объединены в группы. Расстояние между каналами в группах существенно меньше  $\lambda$  и слабо зависит от  $P$ . В условиях эксперимента оно около нескольких миллиметров (рис. 1,  $t_n=8$  мкс; рис. 2,  $t_n=4$  и 8 мкс, проекции на  $H$ -плоскость). Это находится в достаточно хорошем согласии с теоретическими оценками, выполненными на основе работы [1] для расстояний между нитями, возникающими на начальной стадии развития ионизационно-перегревной неустойчивости.

При  $P > 30$  Тор в процессе развития разряда могут формироваться искровые каналы, окруженные диффузным ореолом (рис. 2,  $t_n=8, 16$  мкс). Они вытянуты вдоль  $E$  и имеют начальный размер около  $\lambda/2$ . При их образовании не наблюдается плазменный фон. Отдельные каналы изолированы друг от друга и от основного объема разряда и появляются по мере движения его границы навстречу ЭМ излучению. От импульса к импульсу расположение отдельных каналов в пространстве не изменяется, само же их появление носит нерегулярный характер (ср.  $t_n=16$  и 40 мкс на рис. 2). Теоретически эта форма разряда, видимо, нигде не рассматривалась.

Искровые каналы описанных форм с течением времени трансформируются в шнуры. Эта форма разряда характерна для поздних стадий его развития и высоких  $P$ . Шнуры сложным образом изгибаются и разветвляются, образуя своеобразный клубок. Характерные масштабы, определяющие его структуру, существенно меньше  $\lambda$ . Шнуры в течение импульса положения не меняют. От импульса к импульсу их конфигурация различна. С увеличением  $P$  диаметр шнуров уменьшается. Яркость свечения шнуровых каналов существенно больше яркости свечения диффузного разряда. Характерной особенностью этого типа разряда является его способность распространяться в область, где  $E < E_{\text{проб}}$ . Распространение происходит за счет наращивания длины шнуров. Интегральная фотография не позволяет детализировать этот процесс. Не ясно, сохраняется ли яркость свечения первоначальных участков шнуров или светятся лишь их вновь формирующиеся концы.

Рассмотрим осциллограмму, показанную на рис. 4 ( $P=120$  Тор), для которого типична шнуровая форма. Передний фронт импульса связан с постепенным перекрытием поперечного размера области зондирования разрядом (что видно из рис. 1), граница которого перемещается в сторону зеркала со скоростью около  $10^5$  см/с. Процесс перекрытия завершается через 30 мкс. В это же время (рис. 4) наблюдается максимальное затухание зондирующего сигнала. Оно соответствует средней  $n_e=3.5 \cdot 10^{12}$  1/см<sup>3</sup>. При такой ионизации внутренние области разряда будут экранированы, что, видимо, объясняет падение  $n_e$  в течение оставшейся части импульса. Распад плазмы происходит за десятки микросекунд, что, как показано в [8], указывает на термический характер ионизации в шнурах. Уменьшение  $n_e$  в этом случае связано с остыванием газа в каналах за счет теплопроводности. Оценивая по известной зависимости времени выравнивания температуры от размера тепловой неоднородности температуру газа в шнурах, в данном случае получим значение около  $10^4$  К. Шнуровая форма характерна для высоких  $P$  и оптического разряда. В [7] указываются работы, констатирующие, что лазерная искра состоит из тонких нитей.

Сравнивая результаты эксперимента с теорией, развитой в [3, 4], нужно отметить, что реальная картина явления более богата содержанием, чем модель, заложенная в теоретические построения. Определяющую роль в развитии структуры разряда играют процессы его «распространения». Именно они должны быть предметом дальнейшего экспериментального и теоретического исследования.

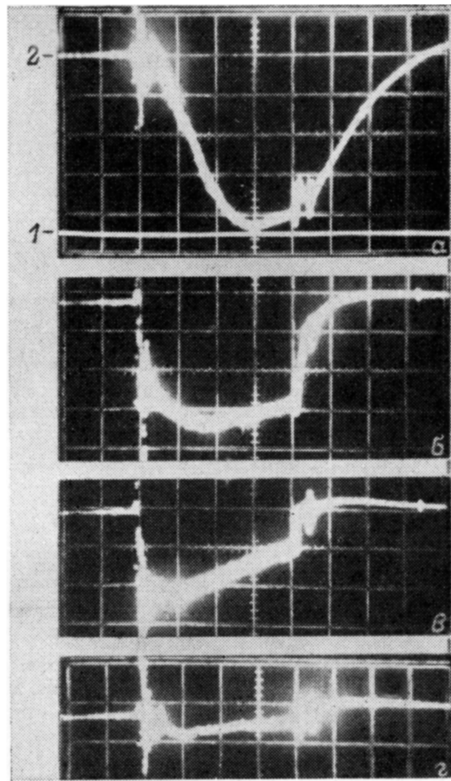


Рис. 4.

Таким образом, получение неравновесной плазмы с помощью безэлектродного разряда возможно лишь в определенных условиях. При высоких и средних  $P$  она существует на ранних его стадиях. При низких  $P$  внутренние области разряда могут экранироваться его границами.

### Список литературы

- [1] Быков Ю. В., Голубев С. В., Гольденберг А. Л., Зорин В. Г. // ЖТФ. 1984. Т. 54. Вып. 4. С. 723—726.
- [2] Грачев Л. П., Есаков И. И., Мишин Г. И., Никитин М. Ю., Ходатаев К. В. // ЖТФ. 1985. Т. 55. Вып. 2. С. 389—391.
- [3] Гильденбург В. Б., Ким А. В. // ЖЭТФ. 1978. Т. 74. Вып. 1. С. 141—147.
- [4] Гильденбург В. Б., Ким А. В. // Физика плазмы. 1980. Т. 6. № 4. С. 904—909.
- [5] Грачев Л. П., Есаков И. И., Князев М. П. и др. // ЖТФ. 1984. Т. 54. Вып. 7. С. 1353—1355.
- [6] Бродский Ю. Я., Венедиктов И. П., Голубев С. В. и др. // Письма в ЖТФ. 1980. Т. 10. Вып. 3. С. 187—190.
- [7] Райзер Ю. П. Лазерная искра и распространение разрядов. М.: Наука, 1974. 307 с.

Физико-технический институт  
им. А. Ф. Иоффе АН СССР  
Ленинград

Поступило в Редакцию  
26 мая 1988 г.

В окончательной редакции  
12 октября 1988 г.

## ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ЛАВИННЫЕ ДИОДНЫЕ СТРУКТУРЫ БОЛЬШОЙ ПЛОЩАДИ

А. Ф. Вильянов, Ю. В. Выжигин, Б. Н. Грессеров, В. В. Елисеев,  
В. М. Лихунова, С. А. Максимова, Н. А. Соболев

Лавинный пробой кремниевых  $p-n$ -переходов большой площади носит микроплазменный характер [1]. ВАХ в режиме лавинного пробоя (а следовательно, и лавинная перегрузочная способность) определяется в основном свойствами микроплазмы (МП): их напряжением пробоя, разбросом между напряжениями включения отдельных МП, площадью, занятой включенными МП. В работе [2] сообщается о диодных структурах с напряжением лавинного пробоя  $U_{пр} = 20-250$  В площадью до  $2 \text{ см}^2$ , в которых при  $j \geq 10 \text{ А/см}^2$  наблюдается на большей части  $p-n$ -перехода лавинный пробой. В работе [3] удалось получить лавинные диоды с  $U_{пр} = 0.5-1.9$  кВ площадью до  $1 \text{ см}^2$ .

Настоящая работа посвящена исследованию возможности создания высоковольтных лавинных диодных структур большой площади. В целом ряде работ [4-7] было показано, что в структурах с  $U_{пр} > 1$  кВ возникновение низковольтных МП связано с образованием в области объемного заряда  $p^+-n$ -перехода структурных дефектов с расположением в верхней половине запрещенной зоны глубокими донорными уровнями. Концентрация глубоких уровней в канале МП может составлять  $3-14 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$  [4, 6, 7] в структурах с напряжением пробоя  $U_{пр} = 3-6$  кВ, т. е. относительное снижение напряжения пробоя первых микроплазм может составлять  $0.1-0.3 U_{пр}$  [8]. Поэтому в процессе изготовления диодных структур нами использовались современные технологические методы обработки поверхности полупроводниковых пластин, проведения высокотемпературных процессов и создания контактов, которые позволяли снизить концентрацию глубоких уровней за счет предотвращения проникновения внутрь пластин быстродиффундирующих примесных атомов и снижения степени пересыщения кремния вакансиями или междоузельными атомами.

Исследуемые  $p^+-n-n^+$ -структуры изготавливались с помощью диффузии акцепторных (бора и алюминия) и донорной (фосфора) примесей [3, 5] в нейтронно-легированный кремний с удельным сопротивлением  $140-300 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  (его разброс составлял  $3-5 \%$ ). Глубины залегания  $p^+-n$  и  $n-n^+$ -переходов составляли  $90-100$  и  $20-40$  мкм, поверхностные концентрации бора и фосфора  $\sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$ , алюминия  $\sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , время жизни дырок в  $n$ -базе диод-