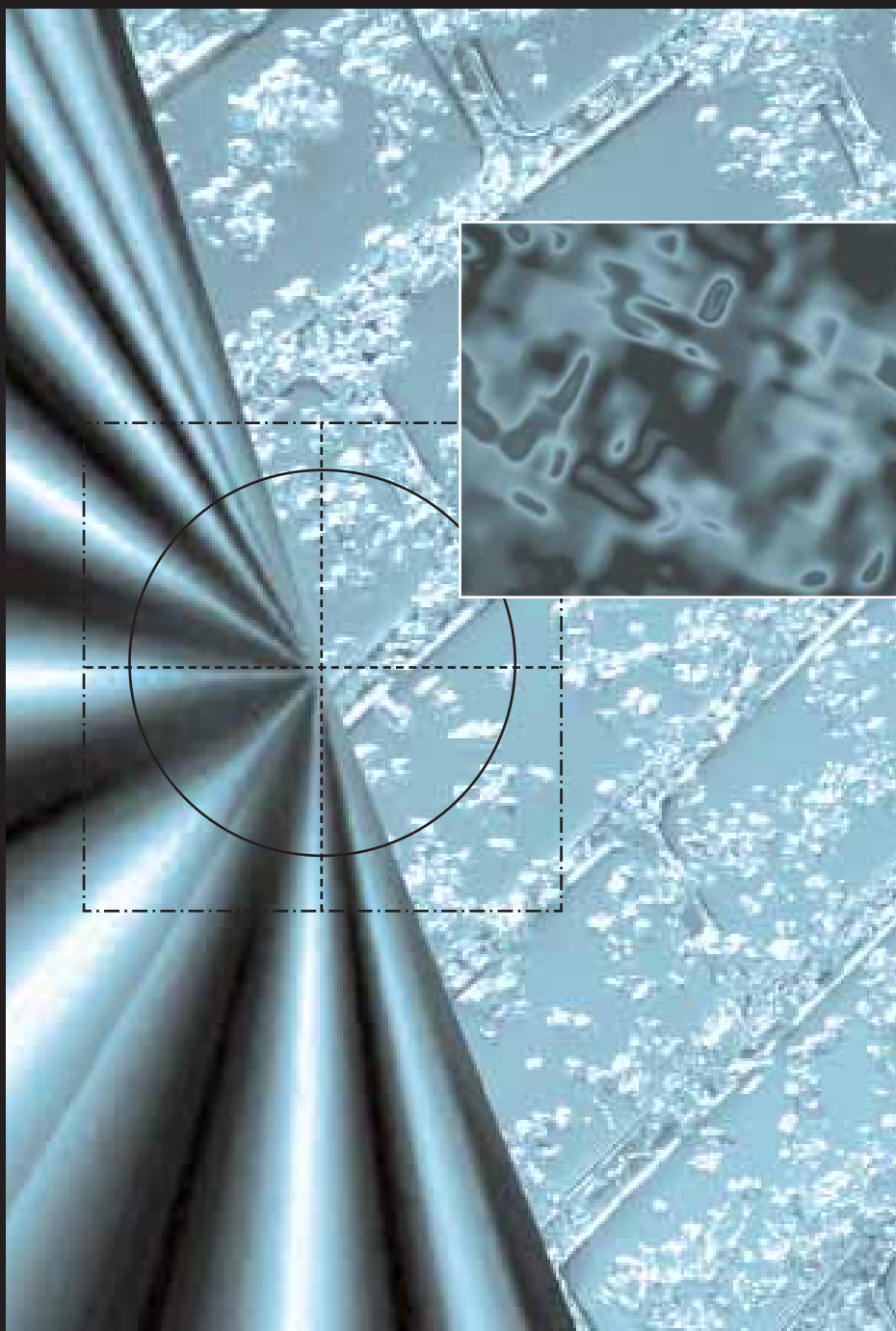


# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНОГО СВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ НА МАТЕРИАЛЫ

*Вернигоров Н.С.*, доктор технических наук, профессор, академик Петровской АН, лауреат премии Совмина СССР,  
*Саркисян А.П.*, кандидат технических наук, полковник,  
*Сулакшин А.С.*, кандидат технических наук, лауреат премии Совмина СССР,  
*Шаркеев Ю.П.*, кандидат технических наук.

*В [1] показано применение сверхмощного СВЧ излучения для разупрочнения горных пород, а в [2] приведены результаты анализа кремниевых пластин с готовыми кристаллами микросхем после радиационного воздействия, что влияет на параметры изготавливаемых в последствии полупроводниковых приборов (ПП).*

*В данной работе также рассматриваются результаты экспериментальных исследований с применением мощного импульсного СВЧ излучения, но с несколько иным уклоном, хотя, как будет показано ниже, воздействие мощного импульсного СВЧ излучения на ПП приборы схоже с радиационным воздействием по [2]. Мы не станем приводить параметры излучения, а определим их следующим образом. По аналогии с квантовой электроникой, в которой при генерации сверхмощного оптического излучения принят термин "генерация гигантских импульсов", определим и сверхмощный импульс СВЧ излучения аналогичным общепринятым термином.*



**Экспериментальные исследования влияния гигантских СВЧ импульсов на металлические материалы**

Гигантские СВЧ импульсы могут приводить к изменению микроструктуры металлических материалов и, следовательно, физико-механических свойств последних [1]. В качестве объекта была выбрана поликристаллическая медь. Образцы для исследований готовились из слитка меди, подвергнутого вакуумной плавке. Затем на электроискровом станке вырезались квадратные пластины площадью 1,5 см<sup>2</sup>, толщиной 300±350 мкм. После механической шлифовки из пластин вырубались диски диаметром 3,2 мм. Путем электролитической полировки с каждой стороны диска удалялся слой толщиной не менее 20 мкм. Затем проводился рекристаллизационный отжиг дисков в атмосфере аргона. Средний размер зерна отожженных дисков меди оказался равным 460 мкм, а предел текучести - 85 МПа. После отжига образцы вновь полировались электролитически и затем подвергались СВЧ воздействию.

Воздействие осуществлялось однократным импульсом с интервалом 30 сек с общим числом импульсов N = 100 при плотности потока мощности на поверхности образцов в 2 кВт/см<sup>2</sup>.

В исходном состоянии поликристаллические образцы меди имели низкую плотность дислокаций ( $\rho = 0,7 \times 10^9 \text{ см}^{-2}$ ), расположенных хаотически. Дальнедействующие поля напряжения в материале отсутствовали. Воздействие СВЧ излучения приводит к генерации дислокаций и формированию разнообразных дислокационных структур в меди. С увеличением расстояния от облучаемой поверхности меди объемные доли полосовой и ячеисто-сетчатой структуры убывают. При этом за пределами расчетного скин-слоя, в основном сетчатая структура, которая постепенно переходит в хаотическую.

Оказалось, что скалярная плотность дислокаций максимальна у поверхности. Максимальная плотность дислокаций составляла  $\rho = 2,6 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ , при этом генерируются значительные напряжения порядка 200-300 МПа, что существенно выше предела текучести исследуемого материала. Наиболее резкое уменьшение скалярной плотности дислокаций наблюдалась в слое, превышающим толщиной 0,4 мкм, тогда как расчетная толщина скин-слоя для меди по условиям эксперимента составляла 1,15 мкм.

Как показал анализ, дислокационные субструктуры во внешней от поверхности половине скин-слоя поляризованы. Это означает, что в локальных местах число дислокаций разного знака различно, что является следствием больших полей напряжений, возникающих в ходе обработки материала СВЧ излучением. Обычно подобные дислокационные структуры формируются в процессе пластической деформации, но при этом ячеистая структура оказывается более четко выраженной, высокоэнергетическая полосовая субструктура при этом виде деформации не возникает вообще, а вместо нее возникает низкоэнергетическая фрагментированная субструктура. Скалярная плотность дислокаций и дальнедействующие

поля напряжений также ниже при пластической деформации.

В дефектной структуре меди при импульсном электромагнитном воздействии запасается больше энергии, чем при пластической деформации. Иначе, воздействие гигантским СВЧ импульсом соответствует пластической деформации при высоких скоростях нагружения, т.е. деформации типа удара или взрыва [3,4].

Аналогичные эксперименты были проведены с некоторыми типами титановых сплавов с тем же результатом - упрочнение механических и улучшение физических свойств.

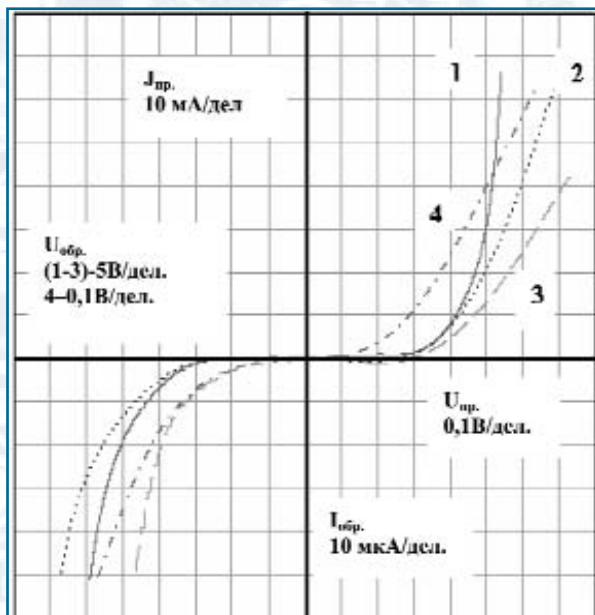
**Воздействие гигантских СВЧ импульсов на полупроводниковые приборы**

Проблема взаимодействия СВЧ излучения с полупроводниковыми приборами является, на первый взгляд, достаточно изученной. Так, первое обоснование механизма воздействия было предложено Вуншем и Беллом в 1968 г. [5]. Результаты многочисленных исследований в этом направлении хорошо изложены в работах [6,7], из которых следует лишь один главный вывод: СВЧ излучение осуществляет необратимый вывод из строя полупроводниковых приборов. В [8] показан несколько иной механизм влияния СВЧ излучения на кремниевые p-n переходы при длительности импульса 5 мкс.

В свете этого в экспериментах [6] рассматриваются полупроводниковые приборы, входящие во входные приемные устройства РЭУ, а именно детекторные и смесительные диоды.

В наших экспериментах использовался широкий класс диодов различного назначения, как-то: КД514А, КД522, Д402, Д602, 2А605Б, 3А610Б. Контроль результатов воздействия проводился по двум методикам с использованием бесконтактной диагностики с последующим измерением вольт-амперных характеристик исследуемых приборов.

Первая методика диагностики осуществлялась при помощи нелинейного локатора по величине регистрируемого сигнала отклика второй гармоники, что позволяло наблюдать быстропотекающие процессы во временном интервале от 0,5 мкс до 1 сек. Перед воздействием снималась исходная вольт-амперная характеристика (ВАХ) исследуемого при-



**Рис. 1. Изменение ВАХ диода КД514А от плотности потока облучающей мощности однократного импульса. 1 - до облучения; 2 - 100 Вт/см<sup>2</sup>; 3- 500 Вт/см<sup>2</sup>; 4 - 1 кВт/см<sup>2</sup>**



бора. В результате экспериментов по данной методике установлено следующее. Воздействие гигантского СВЧ импульса имеет три этапа: кратковременное изменение характеристик с последующим восстановлением до исходных, долговременные изменения, или модификация характеристик без вмешательства в технологию изготовления, и третий этап - необратимый вывод из строя. Результаты эксперимента при долговременном изменении характеристик (от 20 мин до 1 часа) показаны на рис. 1 при воздействии на диод КД514А однократного импульса СВЧ излучения различной плотности потока мощности. В данном режиме были исследованы и диоды Д602Б, 2А605Б. После измерения ВАХ по

результату воздействия, диод вновь контролировался методом нелинейной локализации на предмет сравнения его отклика, через промежуток времени, необходимого для контроля ВАХ на измерительном приборе. Эксперимент показал, что величина отклика оставалась неизменной. Во втором режиме при постоянном значении плотности потока мощности 100 Вт/см<sup>2</sup> использовался периодический сигнал с частотой 3 Гц в течение заданного времени воздействия 1 мин на варакторный диод ЗА610Б (рис. 2). Экспресс-метод диагностики показал наличие периодических изменений регистрируемого сигнала отклика, что соответствует изменениям крутизны ВАХ диодов. При этом наблюдался процесс восстановления ВАХ до первоначального состояния, что так же регистрировалось локатором.

Частота зондирующего сигнала нелинейного локатора была много меньше частоты воздействующего СВЧ импульса, а мощность локатора в импульсе с  $\tau_{имп.} = 2$  мкс составляла 5 Вт и не влияла на процесс

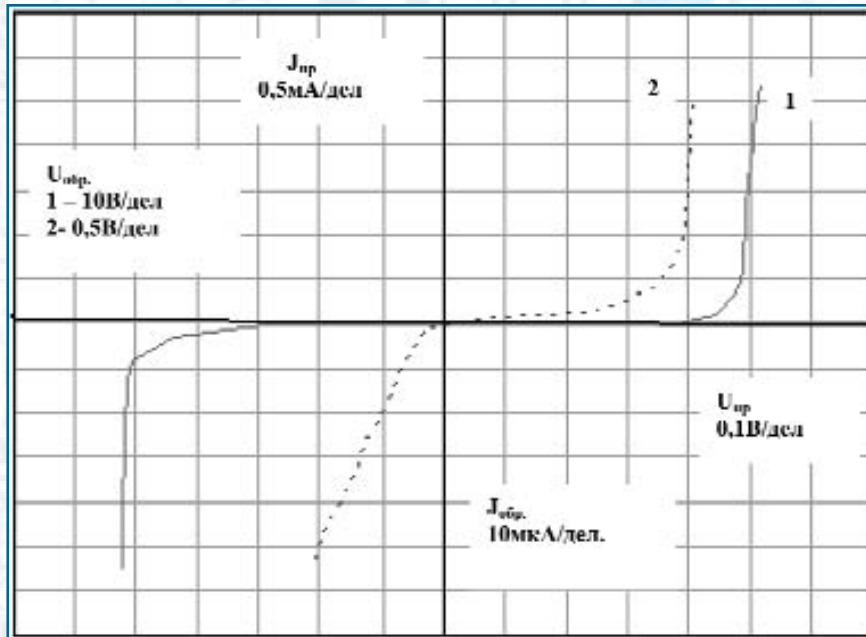
воздействия. Приборы находились в свободном пространстве. При этом диоды КД514А были включены в четвертьволновый вибратор для зондирующей длины волны нелинейного локатора, а диоды Д602, 2А605Б и ЗА610Б облучались в их штатной упа-

Воздействующий сигнал представлял собой пачку импульсов с регулируемым числом в диапазоне 1-20 импульсов и двумя значениями частоты следования в пачке 1 кГц и 3 кГц. Кроме того, использовался режим как одиночной пачки импульсов, так и периодической, с частотой повторения пачек импульсов 50 Гц. Во всех известных ранее экспериментах использовался только режим однократного импульсного воздействия, поэтому исследование влияния периодической последовательности с высокой частотой повторения представлялось весьма актуальным. В эксперименте было использовано 80 образцов детекторных диодов Д402, что позволило получить статистически

обобщенные результаты, учитывающие возможные факторы влияния: разброс параметров диодов, флуктуации параметров воздействующего генератора и пр.

Собственно методика измерения заключалась в том, что после окончания воздействия мощного СВЧ излучения включался калибровочный импульсный генератор, от которого и регистрировался сигнал с детектора. Данная схема осуществляла задержку включения калибровочного генератора от 1 мкс до 5 сек, что позволяло наблюдать динамику поведения ВАХ после воздействия. Выбор временной задержки производился из соображений завершения возможных тепловых релаксационных процессов в теле полупроводника.

На рис. 5 показана нормированная зависимость амплитуды калибровочного сигнала с детектора от числа воздействующих импульсов в пачке при постоянном уровне плотности мощности на раскрыве антенны и времени задержки калибровочного сигнала  $\tau_{зд} = 3$  мкс. Как следует из полученных результатов, зависи-



**Рис. 2. Изменение ВАХ диода ЗА610Б при воздействии периодическим сигналом с частотой следования 3 Гц и плотностью потока мощности 100 Вт/см<sup>2</sup>. 1 - до воздействия 2 - после воздействия в течение одной минуты**

ковке.

Оказалось, что при определенных условиях изменение ВАХ диодов носит весьма долговременный характер. Об этом, как пример, свидетельствовало то, что для диодов ЗА610А были проведены дополнительные электрофизические исследования, осуществленные спустя 5 суток с момента облучения. Результаты этих исследований показаны на рис. 3,4.

Как следует из проведенных исследований, происходят не только изменения ВАХ и вольт-фарадной характеристики (рис. 3) приборов, но и более глубинные процессы, в том числе изменение профиля концентрации мелких доноров в приконтактной области.

По второй методике исследуемый диод включался в антенно-фидерный тракт. Сигнал с нагрузки детектора подавался на осциллограф. Перед воздействием мощного СВЧ импульса производилась калибровка детектора с помощью калибровочного импульсного генератора мощностью 50 мВт.

мость носит не монотонно-убывающий, а убывающий аperiodический характер. При этом для  $n=1$  величина отклика превышает первоначальное (калибровочное) значение, что свидетельствует об изменении детектирующих свойств диода. Это, в свою очередь, объясняется изменением ВАХ, что было получено и по первой методике для одиночного импульса.

В то же время, с увеличением числа импульсов в пачке наблюдается наличие дополнительных минимумов и максимумов, при этом в максимумах сигнал отклика начинает уменьшаться по сравнению с калибровочным. Этот факт говорит о деградации р-п перехода, ранее отмечавшейся в [9,10], и хорошо наблюдается на рис. 1.

Подобное явление может быть объяснено как следствие лавинной генерации носителей заряда в локальных областях р-п перехода [11].

При увеличении плотности потока мощности воздействующего сигнала в виде одиночной пачки с частотой повторения внутри пачки 1кГц до 5 Вт/см<sup>2</sup> начинают проявляться долгосрочные (от 1-2 минут до 48 часов) эффекты деградации ВАХ уже при числе импульсов 1-3, следствием которых являются устойчивые изменения не только амплитуды отклика, но и формы калибровочного импульса. Изменение формы импульса можно объяснить изменением переходной характеристики за счет изменения реактивных параметров диода. Такое поведение отклика связа-

но, как показано, например в [12,13], с локальным выжиганием р-п перехода током шнурового характера, возникающем на неоднородностях р-п перехода. С увеличением плотности потока мощности до 5-8 Вт/см<sup>2</sup> эти эффекты переходят в необратимые, при которых ВАХ диода имеет устойчивое изменение (более 48 часов), а при  $P \geq 10$  Вт/см<sup>2</sup> наступает выход диодов из строя.

Изменение ВАХ диодов на первый взгляд коррелирует с возможным температурным влиянием разогрева р-п перехода. Однако изменение температуры показывает следующее. При воздействии на диод КД514А (рис. 1) однократным СВЧ импульсом, подводимая к кристаллу энергия составляла  $7 \times 10^{-5}$  Дж. Эта величина получена расчетным путем с использованием измерений Ппад. (рис. 1) в точке расположения объекта и пересчета через наведенную на диоде мощность с учетом параметров элементарной приемной антенны объекта. Даже если пренебречь термодинамическим процессом, считая разогрев адиабатическим, то с учетом теплопроводности кремния и размеров кристалла 1,0х0,5х0,2 мм, изменение температуры составит всего 0,44 °С. В то же время, учитывая размер р-п перехода, оказывается, что напряженность поля составляет от 300 В/м, до 500 В/м.

Механизм, предложенный в [5] в данном случае не подтверждается, тем более с помощью модели по [5] невозможно объяснение долговременных устойчивых изменений ВАХ. В то же время влияние гигантского СВЧ импульса излучения качественно совпадает с результатами радиационного отжига.

В данном случае изменение электрических свойств можно объяснить только за счет полевого эффекта. Максималь-

ная напряженность поля, при которой наступает пробой для резкого р-п перехода определяется из [13]:

$$E_{\max} = \frac{4 \times 10^5}{1 - 1/3 \lg(N_B/10^{16})}, \text{ [В/см]}$$

где  $N_B$  - концентрация примесей в исходном материале, см<sup>-3</sup>, и для исследуемого диода 3А610Б при  $N_B = 10^{14}$  см<sup>-3</sup> -  $E_{\max} = 2400$  В/м.

Электрическая прочность кремния, при которой наступает разрушение материала, составляет 6500 В/м.

Две различных методики контроля воздействия показали одинаковые результаты, а периодическая последовательность импульсов с высокой частотой следования потребовала меньших значений плотности потока мощности для изменения параметров объектов и вывода их из строя.

### Генерация гигантских СВЧ импульсов - как новое оружие электромагнитного поражения

Настоящий раздел написан только одним автором статьи - Вернигоровым Н.С., который берет на себя ответственность за комментарии и высказанные заключения по материалам [14].

В [1] показано влияние мощного СВЧ излучения как технологии разупрочнения горных пород, изменяющее физико-механические свойства материалов и для механических свойств это ведет к их ухудшению от естественного состояния. В настоящей работе показаны те же результаты, но для радиоэлектронных компонентов - полупроводниковых приборов. Все это говорит о том, что сверхмощное СВЧ излучение обладает функцией поражения электронных средств. В свете этого, а также [7], любопытно проследить работу [14].

В [14] заявлено буквально следующее.

Российская Госдума выразила озабоченность по поводу программы США по развертыванию качественно нового типа оружия: "В рамках проекта по активному изучению высокочастотных явлений High Frequency Active Auroral Research Programme (HAARP) [15] США создается новое особое геофизическое оружие, которое может влиять на околоземную среду при помощи высоко-

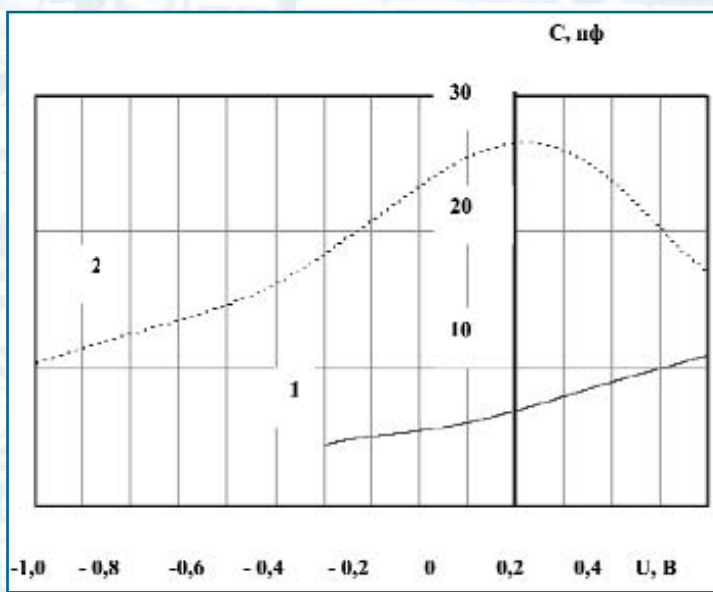


Рис. 3. Вольт-фарадная характеристика диода 3А610Б До (1) и после (2) воздействия



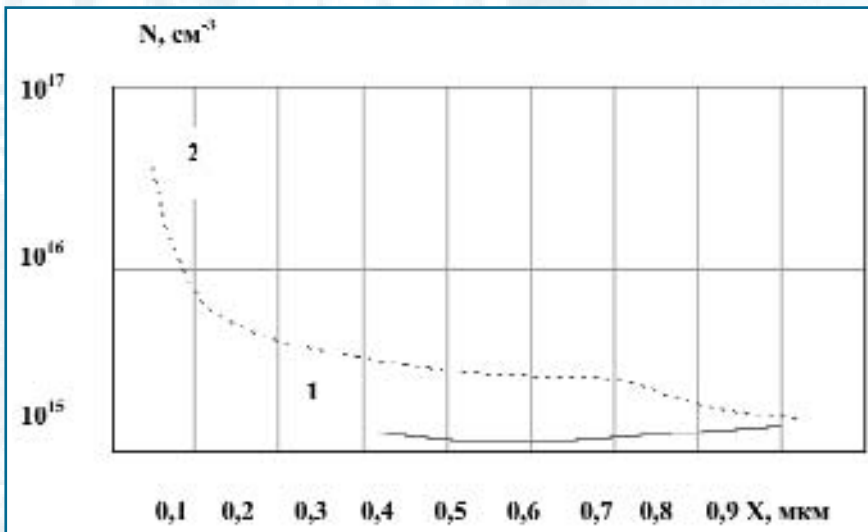


Рис. 4. Изменение профиля концентрации мелких доноров в приконтактной области диода ЗА610Б до (1) и после (2) воздействия

частотных радиоволн, - заявили представители Госдумы в своем обращении 8 августа 2002 г. - Значение этого нового прыжка в технологиях может сравниться с переходом от холодного оружия к огнестрельному или от обычного оружия к ядерному. Планы США включают в себя полномасштабные научные эксперименты в рамках программы HAARP, неконтролируемые международным сообществом, а также создания оружия, способного пресекать все радиоканалы и провоцировать сбои в оборудовании, установленном на космических кораблях, ракетах, вызывать серьезные сбои в электросети, газо- и нефтеснабжении...". Обращение, подписанное 90 депутатами, было отослано Президенту РФ, в ООН, в

парламенты и всем лидерам стран, входящих в ООН, всем научным обществам и в СМИ.

Данная мысль не является фантастикой. Так, в 1993 г. фирма SAAB конкретно рекламировала специальный испытательный центр [16] для исследования воздействия СВЧ излучения на самолеты и ракеты класса "воздух-воздух" и "воздух-земля" с помощью СВЧ генераторов на клатроне мощностью 25, 20 и 5 МВт в диапазонах L, S, и C соответственно, и 1,0 и 0,25 МВт в диапазонах X, Ku соответственно.

Активные исследования по созданию релятивистских генераторов с мощностями от 0,3 до 1,0 ГВт проводятся в США под руководством профессора J. Benford и к началу 90-х го-

дов прошлого века были созданы первые американские экспериментальные генераторы сверхмощного СВЧ излучения. Наиболее подробно результаты этих исследований изложены в [7]. На сегодняшний день можно с уверенностью сказать, что ими достигнуты уровни генерации мощности от 20 до 80 ГВт, что и является основой для создания нового типа оружия.

Вторым возможным видом излучения электромагнитной энергии может являться генерация и излучение высоковольтных сверхкоротких видеоимпульсов. Данный вид излучения при амплитуде 1 МВ и выше и длительности импульса 100-1000 пикосекунд обладает разрушительной силой, многократно превышающей воздействие гигантского короткоимпульсного СВЧ излучения с несущей частотой, например, релятивистского генератора. При работе в условиях открытого космоса и сверхкоротком импульсе не создает предпосылок к невозможности их излучения.

В России подобные исследования велись весьма интенсивно до 1995 г., о чем свидетельствуют краткие материалы настоящей статьи и материалы [1]. Однако, практически полное отсутствие финансирования научных проектов привело не только к отставанию, но и к приостановлению (закрытию) данных исследований, и, как следствие этого, обращение Российской Госдумы к США, которое ими не будет услышано. В рамках создания нового поколения оружия по программе СОИ, главным ударным кулаком будет являться электромагнитное оружие поражения любых объектов за счет вывода из строя их внутренних радиоэлектронных коммуникаций управления. Масса установок сегодня для США уже не является препятствием для их вывода в космос.

Таким образом, развертывание в космосе ударной силы СОИ в виде электромагнитного оружия поражения является делом ближайшего будущего.

В свете этого остается лишь сожалеть о потере отечественных приоритетов в данном направлении, как это неоднократно случалось в XX веке в СССР. Два наиболее всем известных классических примера тому - генетика и кибернетика.

*P.S.* Видимо, в свете [14,15], корреспонденты "Радио России" в про-

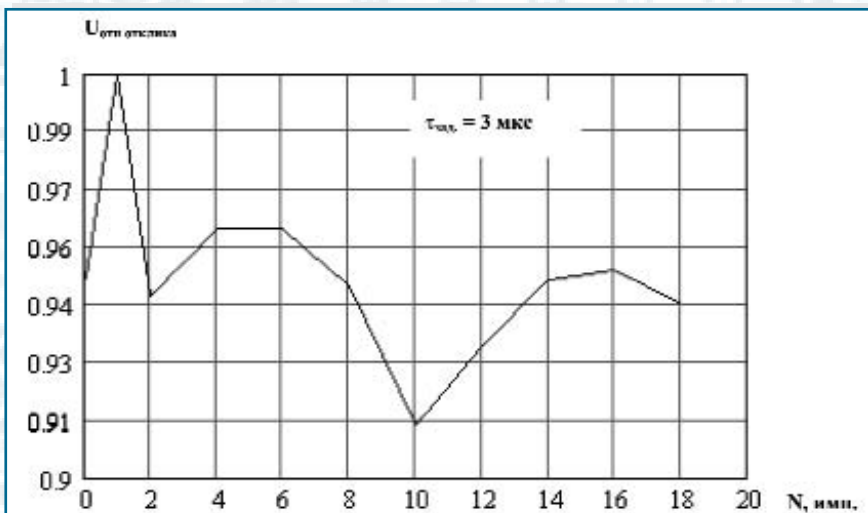


Рис. 5. Зависимость сигнала отклика калибровочного генератора от количества воздействующих импульсов в пакете при частоте следования импульсов 1кГц и времени задержки включения калибровочного генератора 3 мкс

грамме "Вести" от 6 сентября высказали, ссылаясь на руководителя одного из НИИ С-Петербурга, предложение, что "...пожары в Подмосковье, а так же природные катаклизмы на Юге России вызваны применением нового геофизического оружия со стороны США"! Второй раз этот вопрос был поднят И.Проккопенко 29 сентября в программе "Военная тайна", где были показаны документы Госдумы [14] и так же высказано предположение о причастности испытаний по программе HAARP к катаклизмам на Северном Кавказе. Вот уже и началось информационное на-



ступление на программу HAARP.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Петров В.М. Новые применения радиоэлектроники: разрушение горных пород мощным электромагнитным полем СВЧ. // Информост, 2002, №№2,3,4.
2. Приходько П.С., Малюдин С.А., Вавилов В.А., Баринов А.Б. Методика контроля стойкости интегральных микросхем к внешним воздействующим факторам в процессе производства. // Информост, 2002, №3, с.56.
3. Вернигоров Н.С., Диденко А.Н., Шаркеев Ю.П., Сулакшин А.С. и др. Дефектная структура меди после воздействия мощного импульсного электромагнитного излучения СВЧ диапазона. // Доклады РАН, 1994, т.335, № 6.
4. Vernigorov N.S., Didenko A.N., Sulakshin A.S., Koslov E.V., Sharkeev Yu.P. Dislocation structure of copper after exposure by high power pulse microwave. // Proc. of 10-th Int. Conf. on High Power Particle Beams. San Diego, USA, July, 1994.
5. Wunch D., Bell R. Determination of threshold failure levels semiconductor diodes and transistors due to pulse voltage. // IEE Trans., 1968, v.NS-15, N6, p.244-252.
6. Keith Florig H. Interaction and influence highpower microwave on electronics. // Annales de Physique. 1989, vol.14, ?2, p.101.
7. Панов В.В., Саркисян А.П. Некоторые аспекты проблемы со-
8. Аблязимова Н.А., Вейнгер А.И., Питанов В.С. Электрические свойства кремниевых р-п переходов в сильных СВЧ полях. // ФТП. 1988, т.22, вып.1, с.2001.
9. Glan Chance M. Trends in mixer damage. //IEEE MTT, Sint, Microwave Simp. Digest, 1989, p.475.
10. Christon A. GaAs mixer burnout the mechanisms at 36-94 GHz. // Annual Proc. Physics, 1980, p.140.
11. Anand Y. X-band high burnout silicon Shottky barrier diodes. // Microwave Journal, March, 1979.
12. Васс О.Г., Гуревич Ю.Г. Горячие электроны и сильные электромагнитные волны в плазме полупроводников и газового разряда. М., "Наука", 1975.
13. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. М., "Мир", 1984, кн.1. 456 с.
14. <http://rense.com/general28/deathray.htm>
15. <http://server5550.itd.nrl.mil/projects/haarp>.
16. Microwave Test Facility. Saab-Scania AB, Saab Military Aircraft S-58188 Linkoping Sweden.

**НОВОСТИ КОМПАНИЙ**

**СТАРТЕЛЕКОМ - ПОДВЕДЕНИЕ ИТОГОВ**

Руководство телекоммуникационного холдинга "СТАРТЕЛЕКОМ" провело внеочередное собрание Совета Партнеров холдинга.

Целью данного собрания стало подведение итогов коммерческой деятельности холдинга и определения стратегических задач дальнейшего развития.

Холдинг "СТАРТЕЛЕКОМ" объединяет телекоммуникационные компании "СТАРТЕЛЕКОМ", "СТАРТЕЛЕКОМ Северо-Запад", "Стартел", "Стартел СПб", зоной присутствия которых являются города Москва и Санкт-Петербург. Ключевыми направлениями деятельности компаний являются дистрибуторская деятельность по продаже телекоммуникационного оборудования мировых производителей Ericsson, Iskratel, Marconi, Aethra; предоставление полного спектра телекоммуникационных услуг.

Руководство холдинга представило финансовые показатели развития за истекший период текущего года, которые свидетельствуют об успешном выполнении заявленной стартовой программы развития и необходимости внедрения новых целевых программ.

В частности, был отмечен значительный подъем показателей по дистрибуторской деятельности по продаже телекоммуникационного оборудования, что подтверждается выданными сертификатами и дипломами от компаний-партнеров, многие из которых предоставляют эксклюзивные права по продажам на территории России и стран СНГ. Определены новые маркетинговые программы, направленные на продвижение значительно расширенной линейки оборудования.

Были рассмотрены показатели развития компаний "Стартел" и "Стартел СПб", динамика объема продаж, которых позволяет заявлять об успешности и перспективности продвижения услуг международной, междугородной телефонной связи на корпоративном рынке в г. Москве и в г. Санкт-Петербурге. Это стало возможным, в связи со значительным расширением телекоммуникационной сети "СТАРТЕЛЕКОМ" и повышением ее технологических возможностей, посредством увеличения количества обслуживающих коммутаторов.

Подтверждением благополучных для холдинга результатов, является установление прочных партнерских взаимоотношений с ведущими телекоммуникационными компаниями, а также постоянно растущий список компаний-клиентов, среди которых такие как, "ТвойДоДыр", "Пищцефабрика", "Фронда Мебель", фабрика "Невский конди-тер", "Балтийская мануфактура" и др.

Совет Партнеров холдинга "СТАРТЕЛЕКОМ" одобрил предложенные маркетинговые программы продвижения новых и существующих продуктов, а также программу инвестирования в развитие собственной сети и развития специализированных сервисных и учебных центров.

[www.startelecom.ru](http://www.startelecom.ru)