

$N_b$  примеси в базе диода от интегрального потока  $\Phi$  [7] приводит к уменьшению сопротивления базы.

Оценить увеличения напряжения лавинного пробоя в кремнии от температуры можно, согласно рисунка 9 [1]. При прохождении ОИТ выделение тепловой энергии в области р-п-перехода приводит к увеличению значения напряжения пробоя. Для температур от 450°C до 500°C отношение  $V_{проб}/V_{проб300}$  не более 1,3.

#### Расчет тепловых характеристик при прохождении ОИТ

Критическая температура за время прохождения  $t_i$  рассчитывается

$$T_{кр} = Z(t)I_{имп}(U_{проб} + I_{имп}R_b) + T_{окружающая\ среда} \quad (1)$$

где  $U_{проб}$  – напряжение пробоя;  $R_b$  – сопротивление базы;  $I_{имп}$  – ОИТ.

Значение  $T_{кр}$ , приводящей к выходу диода из строя, принимаем равным 570°C. Расчет значений ОИТ, необходимых для достижения  $T_{кр}$ , дал следующие результаты: для длительности импульса 2 мс ОИТ достигает величины 53 А, а для длительности импульса 5 мс – 45 А. Для диодов после ЭО флюенсом  $\Phi = 10^{16}$  см<sup>-2</sup>: для длительности импульса 2 мс величина ОИТ достигает 48 А, а для длительности импульса 5 мс – 45 А. Результаты расчетов приведены в Таблице 1.

#### Экспериментальное исследование влияние ЭО на характеристики диодов

Для исследования в данной работе были выбраны образцы диодов, изготовленные на основе кремниевой р<sup>+</sup>-п-п<sup>+</sup>-структуры с помощью диффузионной технологии и облученные электронами энергией  $E_e = 10$  МэВ и флюенсом  $\Phi = 10^{16}$  см<sup>-2</sup>. Исследование на воздействие ОИТ проводилось на образцах до и после воздействия ЭО (выборка 40 шт.) для длительностей импульсов 2 и 5 мс. На диоды подавались ОИТ с увеличивающейся амплитудой до выхода диода из строя. Усредненные результаты измерений приведены в таблице 1.

**Таблица 1.** Значения основных параметров диодов при прохождении ОИТ.

Длительность импульса, мс	Условия измерения диодов	Z(t), К/Вт	Расчетное значение $R_b$ , Ом	Расчетное значение $I_{имп}$ , А	Измеренное значение $I_{имп}$ , А	Измеренное значение $P_{имп}$ , кВт
2	до облучения	0,045	0,33	54	53	12
	после облучения электронами с флюенсом $\Phi = 10^{16}$ см <sup>-2</sup>		0,20	45	48	10
5	до облучения	0,055	0,33	47	45	10
	после облучения электронами с флюенсом $\Phi = 10^{16}$ см <sup>-2</sup>		0,20	45	43	9

Из таблицы 1 видно, что результаты измерений подтвердили результаты расчетов. Для больших длительностей импульса величина теплового сопротивления больше, поэтому при достижении критической температуры требу-

ется меньшая амплитуда ОИТ. Отношения амплитуды ОИТ и импульсной мощности до и после ЭО составляют  $I_{имп0}/I_{имп1} \approx 1,15$  и  $P_{имп0}/P_{имп1} \approx 1,2$ . Таким образом, ЭО не ухудшает существенно ИЭП диодов и может использоваться при производстве диодов.

#### Заключение

В работе проведено исследование факторов, влияющих на ИЭП диодов. Приведенные в работе результаты расчетов и экспериментальных исследований на тестовых образцах диодов показали, что при увеличении длительности импульса уменьшение величины амплитуды ОИТ, необходимого для достижения критической температуры, происходит за счет увеличения теплового сопротивления. Облучение электронами с энергией  $E_e = 10$  МэВ и флюенсом  $\Phi = 10^{16}$  см<sup>-2</sup> уменьшает значения ОИТ и импульсной мощности менее, чем на 20%.

#### Список литературы:

1. Лысенко А.П. Пробой р-п-перехода и способы повышения пробивного напряжения: учебное пособие. – М.:МИЭМ,2011. – 62 с.
2. Отжиг радиационных дефектов в электронно-облучаемых Mo/n-Si-структурах шотки /Ф.П. Корпунов, И.Г. Марченко, Н.Е. Жданович //Материалы 9-ой международной конференции «Взаимодействие излучений с твердым телом (Минск, 2011) – Минск, 2011.
3. Ванин В.И. Зависимость импульсной электрической прочности полупроводниковых приборов от длительности и формы одиночного импульса напряжения, воздействующего на них//ВАНТ: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2009. – №2.- с. 23 – 27.
4. Владимир Вяхирев Измерение тепловых характеристик полупроводников электронных компонентов//Технология электронной промышленности: Микроэлектроника. – 2013. – №3.- с. 90 – 92.
5. Thermal Impedance Monitoring during Power Cycling Tests / AlexanderHensler, CristianHerold, Josef Lutz, Markus Thoben. //PCIMEurope (Nuremberg, Germany,2011).– Nuremberg, 2011.
6. Беляев А.Е., Басанец В.В., Болтовец Н.С., Зоренко А.В., Капитанчук Л.М., Кладько Л.Н., Конакова Р.В., Колесник Н.В., Коростинская Т.В., Критская Т.В., Кудрик Я.Я., Кучук А.В., Миленин В.В., Атаубаева А.Б. Влияние перегрева р-п-перехода на деградацию мощных импульсных кремниевых лавинно-пролетных диодов// Физика и техника полупроводников. – 2011. – Т. 45, вып. 2 – с. 256-262.
7. Вологдин Э.Н., Лысенко А.П. Интегральные радиационные изменения параметров полупроводниковых материалов: учебное пособие. – М.:МИЭМ,1998. – 89 с.

#### ЭКСТРЕМАЛЬНОЕ НАВЕДЕНИЯ ДЛЯ АНТЕННЫ С ШАГОВЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

*А.В. Стахи, А.В. Максименко  
НИУ ВШЭ,  
Департамент электронной инженерии  
МИЭМ НИУ ВШЭ*

#### Аннотация

В данной статье описывается постановка задачи экстремального наведения для параболической спутниковой антенны с шаговыми двигателями.

#### Введение

Параболические антенны в последнее время находят все более широкое применение в космических и радиорелейных линиях связи. В 1888 году немецкий физик Г. Герц

в своих опытах по СВЧ оптике впервые применил в качестве фокусирующего устройства параболический цилиндр. Интерес к параболическим антеннам не ослабевает и в наши дни в связи со стремительным развитием космических радиотехнических систем и комплексов[1].

### Параболическая антенна

Имеется параболическая антенна с программным управлением, осуществляемым посредством шаговых двигателей. Управление осуществляется по двум осям: горизонтальная ось — ось управления положением по азимуту ( $\alpha$ ), вертикальная ось — по углу места ( $\beta$ ). Задача наведения заключается в том, чтобы приблизить положение антенны по углам ( $\alpha, \beta$ ) к истинному направлению на спутник ( $\alpha^*, \beta^*$ ). Для каждой из осей заданы дискретность шага в градусах (на сколько градусов изменяет своё положение антенна при движении двигателя в 1 шаг,  $N_\alpha$  и  $N_\beta$ ), а также средние времена изменения угла на один шаг ( $t_\alpha$  и  $t_\beta$ ). Начальное положение антенны в пространстве определяется навигационным комплексом (GPS/ГЛОНАСС), электромагнитным датчиком курса и двухосевым наклономером, определяющим наклон антенны относительно земной поверхности[2]. Известно, что электромагнитный датчик курса обладает абсолютной погрешностью определения курса  $\Delta_c$ , а наклономер по каждой из осей имеет абсолютную погрешность  $\Delta_n$ . Управление двигателями антенны осуществляется блоком управления и контроля (БУК). Уровень сигнала для заданного положения антенны измеряется на частоте  $F$  с помощью приёмника сигнала наведения (ПСН). ПСН выдаёт в БУК напряжение  $U_F$ , пропорциональное уровню принимаемого сигнала  $P_F$ . Общая схема функционирования системы наведения антенны представлена на Рисунке 1.

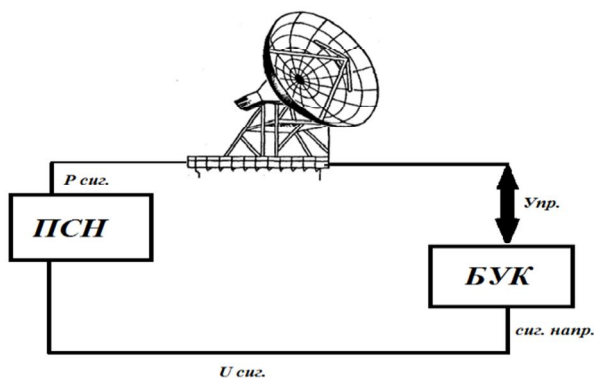


Рис.1.

### Измерения

Измерение уровня сигнала ПСН в каждый момент времени  $i=1, 2, \dots$  происходит с погрешностью, определяемой случайной величиной  $\xi_i$ , т.е.

$$P_i = P_F(\alpha, \beta) + \xi_i \quad (1)$$

Будем исходить из предположения, что известна некая частота  $F$ , такая, что в окрестности истинного направления на спутник, определяемой погрешностью навигационных приборов антенны, нет других спутников, излучающих на этой же частоте сигнал с уровнем выше  $P_b$ [3]. В свою очередь, существует пара чисел  $\varepsilon_\alpha, \varepsilon_\beta$ , такие, что

$$P_F(\alpha, \beta) > P_b \text{ тогда и только тогда, когда } (\alpha - \alpha^*/\varepsilon_\alpha)^2 + (\beta - \beta^*/\varepsilon_\beta)^2 \leq 1 \quad (2)$$

Очевидно, что сама задача наведения сводится к оптимизации критерия:

$$(\alpha - \alpha^*)^2 + (\beta - \beta^*)^2 \rightarrow \min \quad (3)$$

что эквивалентно

$$P_F(\alpha, \beta) \rightarrow \max \quad (4)$$

при ограничениях  $|\alpha - \alpha^*| \leq \Delta_c, |\beta - \beta^*| \leq \Delta_n$ , где  $(\alpha^*, \beta^*)$  — расчётные целеуказания[4].

Время наведения  $T$  складывается из времени сканирования  $T_{scan}$  и времени экстремального наведения  $T_{extr}$

$$T = T_{scan} + T_{extr} \quad (5)$$

$T_{scan}$  зависит от величины шага при нии ( $\alpha_s, \beta_s$ ) и максимального допустимого отклонения ( $P_\delta$ ).

$$|\overline{P}_F(\alpha, \beta) - P_F(\alpha, \beta)| \leq P_\delta \quad (6)$$

Среднее значение оценки измерения:  $\overline{P}_F(\alpha, \beta) = [\sum_{i=1}^{kQ} P_{Fi}(\alpha, \beta)] * \frac{1}{kQ} \quad (7)$

### Заключение

За период времени антенна должна успеть навестись на спутник без каких-либо отклонений, иначе с течением времени мы будем получать ошибочные данные. В нашем случае мы не ограничиваемся лишь поиском максимума сигнала, но при этом ещё и стремимся минимизировать время наведения.

### Список литературы:

1. В. Н. Курильчик «Физика космоса», 1986г.
2. Белянский П.В., Сергеев Б.Г. «Управление наземными антеннами и радиотелескопами», 1980 г.
3. Есепкина Н.А., Корольков Д.В., Парийский Ю.Н., Радиотелескопы и радиометры, М., 1973г.
4. Рахаев А.А. «Устройства СВЧ и антенны. Электронное учебное пособие», 2012г.