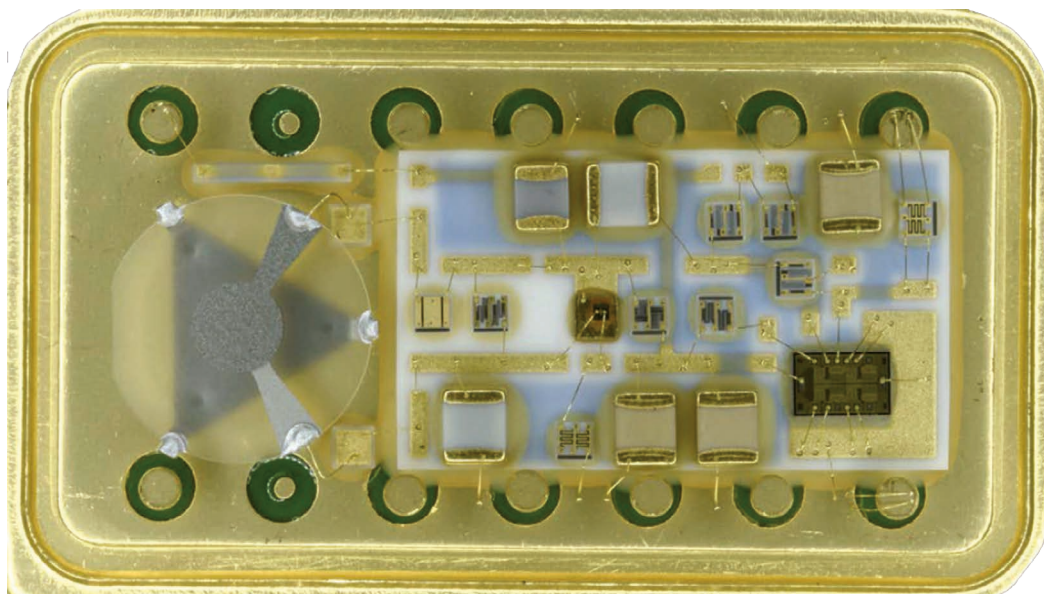


Strahlungswirkungen auf Quarze und Oszillatoren

Quarzresonatoren und -oszillatoren für den Einsatz im Weltraum müssen die Auswirkungen der Strahlung berücksichtigen.



gieffluenz, mit der die Menge der Strahlenbelastung über einen bestimmten Zeitraum in der Einheit MeV pro Quadratzentimeter oder einfach MeV (Millionen Elektronenvolt) angegeben wird. Als nächstes wird die akkumulierte Strahlungsdosis (Total Ionizing Dose, TID) gemessen, die von einem Material absorbiert wird, und zwar in Einheiten von kRad (Kilorad).

Strahlungswirkungen auf den Quarz

Was den Quarzkristall selbst betrifft, so ist die gute Nachricht, dass er im Gegensatz zu vielen anderen elektronischen Bauteilen nicht „stirbt“ und unter keinen vernünftig vorhersehbaren Umständen durch Strahlung außer Betrieb gesetzt wird. Das Einzige, was den Kristall vollständig zerstört, ist ein mechanischer Schock, der stark genug ist, um ihn tatsächlich zu zerbrechen, was möglich ist, aber nicht unter normalen Raumfahrtbedingungen.

Was passieren kann, ist, dass bestimmte Arten und Mengen von Strahlung die Frequenz des Quarzresonators verändern. Das Ausmaß der Frequenzänderung ist normalerweise nicht übermäßig, sondern hängt von vielen Variablen ab, darunter die Frequenz, der Qualitätsfaktor (Q), die Art des Schliffs des Kristalls, die Art der Strahlung und deren Menge.

Die Frequenzveränderung ist in erster Linie auf sehr geringe Verunreinigungen im Siliziumdioxid-Quarzkristallgitter zurückzuführen. Diese verschiedenen möglichen Verunreinigungen

Dabei sind zunächst die Auswirkungen der Strahlung auf den Quarz selbst und dann auf alle anderen Komponenten des Oszillators zu berücksichtigen.

Ionisierende Strahlung

Die hier behandelte Art von Strahlung wird als ionisierende Strahlung bezeichnet, weil sie genügend Energie besitzt, um elektronische Bauteile zu beschädigen, indem sie Atome oder Moleküle ionisiert, indem sie ihnen Elektronen entzieht (wodurch das betreffende Atom oder Molekül elektrisch geladen wird).

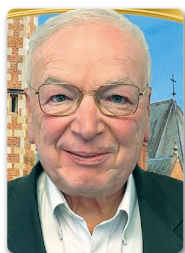
Hintergrund: Bei elektromagnetischen Wellen nimmt die übertragene Energie mit der Frequenz zu. Sichtbares Licht oder Mikrowellen haben normalerweise noch nicht genug Energie, um elektronische Schaltkreise (oder Lebewesen) zu schädigen, aber Röntgen- und insbesondere Gammastrahlen können Schäden verursachen.

Wir wissen, dass sich elektromagnetische Wellen auch als

Teilchen beschreiben lassen, die auch Photonen genannt werden. Photon kommt von „Licht“; das sind – anschaulich gesagt – die „Energiepakete“, aus denen elektromagnetische Strahlung besteht. Ein Photon hat keine Masse, aber eine Energie und einen Impuls – die beide proportional zu seiner Frequenz sind. Ein Photon des sichtbaren Lichts hat eine bestimmte Energiemenge, die unproblematisch ist, ein Gammastrahlen-Photon jedoch hat ein viel höheres Energieniveau, das sehr wohl problematisch ist. Alle abgestrahlten Teilchen mit tatsächlicher Masse, wie Elektronen, Protonen, Neutronen und Ionen, haben genug Energie, um ein Problem darzustellen.

Wichtige Strahlungsmessungen

Angesichts der Bedeutung der Energiemenge, die mit der Strahlenbelastung einhergeht, ist es wichtig zu wissen, wie diese charakterisiert und quantifiziert wird. Es gibt zwei gebräuchliche Maßstäbe und Maßeinheiten. Erstens die sogenannte Ener-



Autor:
Ron Stephens
Q-Tech Corporation
<https://q-tech.com/>

Umgebung oder Umlaufbahn	Anwendungen	Industriestandard TID
Weltraum (Deep Space)	interplanetarische Einsätze	300 krad+
GEO	kommerziell, militärisch, wissenschaftlich (Com, Mil, Scientific)	100 krad
MEO	kommerziell, Navigation (Com, Nav)	100 krad
LEO	kostengünstige Megakonstellationen	30...50 krad

Diese Tabelle betrifft den Industriestandard für die gesamte ionisierende Strahlendosis (TID) in den erdorbitalen Bereichen und des Weltraums

können sich im Quarz lösen und bewegen, was zu kleinen Frequenzänderungen führt.

Ein Quarz für elektronische Zwecke wird unter sehr hohen Temperatur- und Druckbedingungen synthetisch gezüchtet. Hier wurden enorme Verbesserungen erzielt, sodass die durch die Strahlung verursachten Frequenzschwankungen heute deutlich reduziert werden.

Darüber hinaus wird ein Quarz für die Verwendung in Resonatoren für den Weltraum einem speziellen Verfahren unterzogen, das als Sweeping bezeichnet wird. Beim „Sweepen“ von Quarzstäben werden diese einem sehr hohen unidirektionalen elektrostatischen Gleichstromfeld von 1000 V/cm (400 V/Zoll) ausgesetzt und gleichzeitig einer sehr hohen Temperatur von etwa 500 °C, wobei der Stromfluss überwacht wird.

Dieses „Sweepen“ führt dazu, dass viele Verunreinigungen durch die Quarzbarren hindurch zu den Kanten wandern, die dann mit einer Säge abgeschnitten werden, so dass die reinen Quarzbarren übrigbleiben, die als „gesweepeter Quarz“ bekannt sind.

Der gereinigte Quarzbarren weist eine verbesserte Strahlungsempfindlichkeit auf. In den meisten (fast allen) Quarzspezifikationen für Weltraumanwendungen ist daher festgelegt, dass ein gesweepeter Quarz verwendet werden muss.

Die in den präzisesten Quarzoszillatoren verwendeten Resonatoren, typischerweise SC-Cut-Quarze in OCXOs (Oven Controlled Crystal Oscillators), ändern ihre Frequenz in den meisten Strahlungsumgebungen nur um wenige oder mehrere ppb (parts per billion). Wenn man sie gut charakterisiert und versteht, kann man mit dieser Art von Frequenzänderungen umgehen.

Die typischen Quarzresonatoren, die in weniger präzisen XO (einfachen Quarzoszillatoren) verwendet werden, ändern die Frequenz in der Regel um einige oder mehrere ppm, und da die Toleranzen bei diesen XO in der Regel etwa ±50 ppm betragen, kann dies ebenfalls in Kauf genommen werden.

Tatsächlich hat sich das Wachstum hochwertiger Quarzbarren sogar so stark verbessert, dass viele Unternehmen in XO für einige der weniger anspruchsvollen Weltraumumgebungen nichtgesweepeten Quarz verwenden.

Strahlungseffekte auf Oszillatorebene

Strahlungsauswirkungen auf die anderen elektronischen Komponenten in einem Oszillatorgehäuse sind ein komplizierteres Thema, da alle aktiven Bauelemente (Halbleiter, Transistoren, digitale elektronische Bausteine usw.) durch verschiedene Arten von Strahlung beeinträchtigt werden können.

Die ionisierende Gesamtdosis (TID) ist die kumulative absor-

bierte Dosis in einem bestimmten Material, die sich aus der Energie der ionisierenden Strahlung bei einer Dosisleistung zwischen 50 und 300 rad(Si)/s ergibt. Für elektronische Bauteile ist TID ein möglicher langfristiger Ausfallmechanismus, s. auch Tabelle. Um eine solche Zertifizierung zu erhalten, müssen die Bauteile aus einem Los stammen, von dem eine repräsentative Probe mindestens das Doppelte des betreffenden TID-Wertes oder 200 krad überstanden hat, um die 100-krad-Konformität des Loses zu bestätigen. Diese Prüfung wird in einem so genannten RLAT-Bericht (Radiation Lot Acceptance Test) festgehalten.

Die Enhanced Low Dose Rate Sensitivity (ELDRS) ist vergleichbar mit TID, doch die gesamte erforderliche Strahlung, z.B. 100 krad, wird mit einer viel geringeren Dosisleistung verabreicht, normalerweise 0,01 bis 0,1 rad(Si)/s. Die Bestrahlungstests müssen daher viel länger dauern, bis zu 120 Tage. Der Grund dafür ist, dass paradoxerweise einige Komponenten durch langsamere Strahlungsraten stärker beeinträchtigt werden als durch schnellere Raten. Glücklicherweise handelt es sich bei den für ELDRS anfälligen Komponenten in erster Linie um bipolare Halbleiter. Werden diese nicht verwendet, ist es nicht notwendig, ELDRS zu testen.

Eine sehr wichtige Art von Strahlung sind Einzelereignis-Effekte (Single Event Effects, SEE). Einzelereignisse werden durch

einen einmaligen Aufprall eines Teilchens (in der Regel eines schweren Ions) verursacht. Die Stärke des Ereignisses wird in MeV (Millionen Elektronenvolt) gemessen.

SEEs werden in mindestens drei Hauptkategorien unterteilt, die nach Schweregrad geordnet sind:

- Einzelereignis-Transienten (SET)
- Einzelereignis-Upsets (SEU)
- Einzelereignis-Latchups (SEL)

Ein wesentlicher Unterschied zwischen TID und SEE besteht darin, dass TID ein kumulativer Effekt ist, der sich im Laufe der Zeit durch alle Arten von Umgebungsstrahlung aufbaut, während SEE-Schäden fast sofort auftreten, wenn ein hochenergetisches Teilchen auf ein Halbleiterbauelement trifft.

Da die Leitungsabstände integrierter Schaltkreise immer enger werden, kann der Aufprall eines Partikels einen Kurzschluss zwischen zwei Leitungen oder andere katastrophale Schäden verursachen, die möglicherweise zu einem Totalschaden im Gerät führen.

Ein SET entsteht, wenn sich die bei einem Ionisierungsereignis gesammelte Ladung in Form eines Störsignals entlädt, das sich durch den Stromkreis bewegt. Dies ist de facto der Effekt einer elektrostatischen Entladung. Es handelt sich um einen weichen Fehler, der reversibel ist. SET-Ereignisse, die sich vollständig selbst erholen, sind die am wenigsten katastrophalen SEE-Ereignisse, aber dennoch wichtig und können in manchen Fällen dazu führen, dass ein Bauteil nicht für den vorgesehenen Verwendungszweck eingesetzt werden kann.

SEUs sind Zustandsänderungen von Speicher- oder Registerbits, die durch ein einzelnes Ion verursacht werden, das mit dem Chip interagiert. Sie verursachen zwar keine dauerhaften Schäden am Gerät, können aber bei einem System, das sich von einem solchen Fehler nicht erholen kann, zu dauerhaften Pro-

blemen führen. Dies sind weiche Fehler, die reversibel sind. SEUs können zu funktionalen Einzelereignisunterbrechungen (Single-event Functional Interrupts, SEFI) werden, wenn sie Steuerschaltungen wie Zustandsautomaten stören und das Gerät in einen undefinierten Zustand, einen Testmodus oder einen Halt versetzen, der dann einen Reset oder einen Stromversorgungszyklus erfordert, um wiederhergestellt zu werden.

Ein SEL ist ein schwerer Fehler und kann nicht rückgängig gemacht werden. Bulk-CMOS-Bauelemente sind am anfälligsten. SEL-Ereignisse führen dazu, dass ein Halbleiter „durchbricht“ oder „stirbt“. Er wird sich überhaupt nicht von selbst erho-

len. Das ist für eine Anwendung im Weltraum niemals akzeptabel.

Eine prompte Dosis ist am wahrscheinlichsten bei der Detonation einer Atombombe, die eine große Menge an Strahlung mit einer Rate von $1E^8$ bis $1E^{13}$ Rad pro Sekunde freisetzt.

Interessanterweise können richtig konstruierte, hochzuverlässige SC-Cut-Kristallresonatoren aus geschliffenem Quarz nicht nur diese extrem energiereichen und heftigen Strahlungsereignisse überstehen, sondern sogar mechanisch weiterschwingen, während selbst die besten elektronischen Komponenten einen kurzen Ausfall von wenigen bis 20 ns erleben. Diese wichtige Aufrechterhaltung von Phase und Frequenz durch die mechanische Vibration eines doppelt

rotierten Quarzkristalls in einem OCXO wird als Schwungraddefekt (flywheel effect) bezeichnet.

Neutronenverdrängungsschäden und kumulative Effekte sind allmähliche Effekte, die während der gesamten Lebensdauer der Elektronik, die einer Strahlungs-umgebung ausgesetzt ist, aufgrund der durch die Strahlung in die Elektronik eingebrachten Energie auftreten.

Ein Gerät, das empfindlich auf TID oder Verdrängungsschäden (Displacement Damage, DD) reagiert, fällt in einer Strahlungs-umgebung aus, wenn die akkumulierten TID die Toleranzgrenzen erreicht haben. DD erzeugt Defekte im Halbleitergitter, die zu langfristiger elektrischer Beeinträchtigung führen. Bipolare Bauelemente (BJTs, Dioden,

MOSFETs) sind anfällig für DD durch Neutronen oder Protonen. DD wird nicht in einer Einheit gemessen, sondern nur in ihren Auswirkungen auf die Geräte. Der Verdrängungsschaden wird durch die Partikelfluenz in Partikel/cm² ausgedrückt, d.h. N/cm² oder P/cm².

Fazit

Es gibt noch viele andere Arten von Strahlung, und jede der oben genannten Strahlungsarten hat viele wichtige Details und Nuancen, auf die hier nicht eingegangen wird. Der Verfasser möchte dem Leser mit diesem Artikel einen kurzen Überblick und ein gewisses intuitives Verständnis für die Tragweite des Themas vermitteln. ◀

EINKAUFSFÜHRER HF-PRAXIS

mit umfangreichem Produktindex, Firmenverzeichnis und deutschen Vertretungen ausländischer Firmen.

Alle Infos unter:

www.beam-verlag.de/einkaufsfuehrer

Kontakt: info@beam-verlag.de

Einsendeschluss für Unterlagen: **21.06.2024**

Anzeigenschluss: **28.06.2024**



JETZT UNTERLAGEN ANFORDERN!